

**ANALISIS INJEKSI PEMBANGKIT BARU HERA DAN BETANO PADA
SISTEM INTERKONEKSI DI EDTL TIMOR LESTE**

TESIS

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
KONSENTRASI SISTEM TENAGA LISTRIK**

**Diajukan untuk memenuhi persyaratan
Memperoleh gelar Magister Teknik**



**FRANCISCO SALSINHA MARTINS
NIM 136060300111043**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2017**

ANALISIS INJEKSI PEMBANGKIT BARU HERA DAN BETANO PADA SISTEM INTERKONEKSI DI EDTL TIMOR LESTE

TESIS



oleh:

Nama : Francisco Salsinha Martins
NIM : 136060300111043
Program Magister : Teknik Elektro
Minat : Sistem Tenaga Listrik

Naskah tesis ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
Pada tanggal _____

Ketua,

Anggota,

Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPM.
NIP. 19730520 200801 1 013

Ir. Wijono, M.T., Ph.D.
NIP. 19621111 198903 1 003

Mengetahui,
Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro

Dr. Eng. Panca Mudjirahardjo, ST., MT.
NIP. 19700329 200012 1 001

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2017**

JUDUL TESIS:

**ANALISIS INJEKSI PEMBANGKIT BARU HERA DAN BETANO PADA SISTEM
INTERKONEKSI DI EDTL TIMOR LESTE**

Nama Mahasiswa : Francisco Salsinha Martins
NIM : 136060300111043
Program Studi : Program Magister Teknik Elektro
Minat : Sistem Tenaga Listrik

KOMISI PEMBIMBING

Ketua : Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPM.
Anggota : Ir. Wijono, M.T., Ph.D.

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Prof. Dr.Eng. Ir. Abraham Lomi, MSEE.
Dosen Penguji 2 : Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc.
Tanggal Ujian : 13 November 2017
SK Penguji : 1507 Tahun 2017

PERNYATAAN ORISINALITAS PENELITIAN TESIS

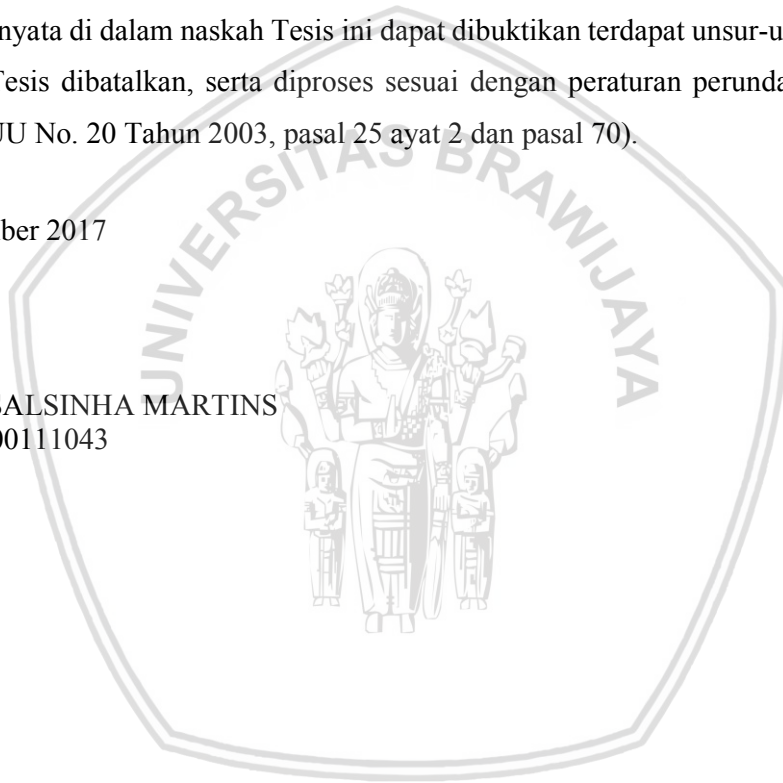
Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Tesis ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Tesis dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, Desember 2017

Mahasiswa,

FRANCISCO SALSINHA MARTINS
NIM. 136060300111043



Lembar Persembahkanku.



Teruntuk:

Karya Ilmiah ini akan ku persembahkan
kepada kedua orang tua dan mertuaku beserta
istriku yang tercinta dan ke tujuh anak ku yang tersayang

RIWAYAT HIDUP



Francisco Salsinha Martins, S.T. lahir di Maubisse 3 April 1974 di Timor Leste Putra kedua dari Bapak Jose Manuel dan Ibu Rosa Mendonca (Almarhumah). Pendidikan sekolah dasar di SDN 9 Vila-Verde Dili Timor Leste pada tahun (1981-1987). Pendidikan sekolah menengah pertama SMP Negeri 1 Liceu di Dili Timor Leste pada tahun (1987-1990). Pendidikan sekolah menengah kejuruan STM di Becora Dili Timor Leste pada tahun (1990-1993). Melanjutkan Pendidikan S1 di Universitas Widyagama Malang jurusan Teknik Elektro pada tahun (2009-2013). Sekarang melanjutkan studi Program Magister (S2) Teknik Elektro Minat Sistem Tenaga Listrik Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang pada tahun 2013-2017. Selama menempuh pendidikan Program Magister, penulis berstatus sebagai pegawai negeri di Electricidade De Timor Leste (EDTL) Timor Leste mulai dari Tahun 2009 sampai sekarang.

Malang, Desember 2017

Penulis

UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji dan syukur ke hadirat Tuhan yang maha kuasa, atas kasih karunia-MU sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan tesis ini.

Dalam penyelesaian penelitian tesis ini, penulis banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya dan setulusnya kepada:

1. Bapak Muhammad Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang.
2. Bapak Dr. Eng. Panca Mudjirahardjo, S.T., M.T. selaku Ketua Program Magister Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang.
3. Bapak Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPM. selaku Dosen Pembimbing I.
4. Bapak Ir. Wijono, M.T., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing II.
5. Prof. Dr.Eng. Ir. Abraham Lomi, MSEE. selaku Dosen Penguji I.
6. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. selaku Dosen Pendamping Penguji II.
7. Bapak Eng. Januario Pereira selaku Mentri Muda kelistrikan Timor Leste.
8. Bapak Eng. Virgilo Fatima Guterres selaku Direktur Utama EDTL Timor Leste, Bapak Eng. Inacio de Jesus Leite selaku DNPEE (Director Nacional de Producao de Energia Electrika) Timor Leste, Bapak Eng. Roberto M. Marcal selaku DNTEE (Director Nacional de Transmicao Energia Electrica) Timor Leste, Bapak Eng. Sigismundu A. Liberato selaku DNDEE (Director Nacional de Distribuicao Energia Electrika) Timor Leste, Bapak Eng. Jose Fernandes selaku DNAC (Director Nacional dos Apoios Clientes) Timor Leste, Bapak Eng. Kasius Klei de Jesus Marcelino Magno Diax Ximenes selaku DNPDE (Director Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento) Timor Leste, Bapak Eng. Luciano Hornai selaku DNER (Director Nacional Energia Renovaveis) Timor Leste, Bapak Domingos Bonaparte Soares selaku Kepala PLTD Eksisting Timor Leste, Bapak Antonio Guttheres selaku Kepala Distribusi 20 kV distrik Dili.
9. Seluruh pejabat dan koordinator Distribusi 20 kV Wilayah Timor Leste dan 9 Gardu Induk (GI) 150 kV Timor Leste.
10. Semua rekan-rekan mahasiswa Strata (S2) Program Studi Teknik Elektro Minat Sistem Tenaga Listrik angkatan 2011, 2012, dan 2013 Universitas Brawijaya Malang.
11. Segenap staf dan karyawan Fakultas Teknik dan Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang.
12. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu sehingga tesis ini dapat diselesaikan dengan baik.

Malang, Desember 2017

Penulis

RINGKASAN

Francisco Salsinha Martins, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Desember 2017, *Analisis Injeksi Pembangkit Baru Hera dan Betano pada Sistem Interkoneksi di EDTL Timor Leste*, Dosen Pembimbing: Hadi Suyono dan Wijono.

Penyediaan tenaga listrik yang kontinyu dan handal harus segera dilakukan oleh penyedia tenaga listrik guna mencukupi kebutuhan konsumen yang terus meningkat. Hal utama yang paling sering dilakukan yaitu dengan membangun pembangkit-pembangkit baru skala besar yang saling terinterkoneksi guna memenuhi kebutuhan tersebut.

Sistem kelistrikan Timor Leste disuplai dari pembangkit-pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) skala kecil yang tidak saling terinterkoneksi, akibatnya kontinuitas penyaluran tenaga listrik di beberapa distrik terhambat sehingga sering terjadinya pemadaman listrik. Untuk menanggulangi hal tersebut, langkah kongkrit yang dilakukan pemerintah Timor Leste yaitu dengan membangun dua unit PLTD terpusat berkapasitas total 250 MW yang berada di distrik Dili kapasitas 120 MW dan distrik Same kapasitas 130 MW. Pembangkit baru ini akan diinjeksikan ke sistem kelistrikan Timor Leste melalui saluran transmisi 150 kV. Adanya injeksi pembangkit baru ini akan menyebabkan perubahan aliran daya dan stabilitas sistem Timor Leste secara keseluruhan. Analisis *steady state* dilakukan meliputi analisis aliran daya sebelum dan sesudah injeksi PLTD Hera dan Betano (sistem eksisting 20 kV distrik Dili dan sistem baru 150 kV dengan 9 *substation*) sehingga dapat dilihat adanya perubahan profil tegangan dan pengurangan rugi-rugi daya listrik. Di samping analisis *steady state* juga dilakukan analisis stabilitas sistem tenaga untuk mengetahui kemampuan sistem apakah bisa kembali beroperasi normal setelah mengalami gangguan hubung singkat tiga fasa sebelum dan sesudah injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano.

Hasil analisis *steady state* menunjukkan bahwa kondisi tegangan sistem sebelum injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano mengalami penurunan mencapai 13% dari tegangan kirimnya, dan rugi-rugi daya aktif sebesar 6,8%. Setelah dilakukan injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano penurunan tegangan hanya berkisar 6%, dan rugi-rugi daya aktif dapat diminimalisir menjadi sebesar 5,3%. Hasil analisis stabilitas sistem tenaga menunjukkan stabilitas sudut rotor, stabilitas frekuensi dan stabilitas tegangan pada saat terjadi gangguan lebih stabil setelah dilakukan injeksi pembangkit baru dengan waktu pemulihan yang lebih cepat jika dibandingkan dengan sebelum injeksi pembangkit baru.

Kata kunci : Steady State, Stabilitas Dinamik, Pembangkit Baru, Injeksi PLTD Hera, Injeksi PLTD Betano

SUMMARY

Fransisco Salsinha Martins, *Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, December 2017, The Injection Analysis of Hera and Betano New Power Plants on Interconnection System in ECTL Timor Leste, Academic Supervisor: Hadi Suyono and Wijono.*

Continuous and reliable electric power supply must be immediately carried out by the electric power providers to sufficient the consumer increasing demands. The eminent thing that is most frequently done is to build a new interconnected large-scale generator to meet the demands.

Timor-Leste's electricity system is supplied from small-scale diesel power plants not interconnected. Therefore, the continuity of electric distribution in some districts are hampered resulting in a power outage. To cope with that, the concrete steps taken by the government of Timor Leste is by building two centralized power plant units with a total capacity of 250 MW; 120 MW capacity located in the Dili district and 130 MW capacity located in Same district. The new plant will be injected into the East Timorese electrical system through a 150 kV transmission line. The existence of this new generator injection will cause changes in power flow and stability of the entire East Timor system. The Steady state analyzes being carried out includes the analysis of power flow before and after the injection of Hera and Betano diesel power plants (20 kV of Dili district existing system and 150 kV new system with 9 substations) so that there can be a change in voltage profile and reduction of electric power losses. In addition to the steady-state analysis, a stability analysis of the power system is also conducted in order to determine whether the system can return to normal operation after experiencing a three-phase-short-circuit-interruption before and after the injection of Hera diesel power plant and Betano Diesel power plant.

The results of steady-state analysis show that the system voltage condition before the injection of Hera and Betano diesel power plants decreased to 13% from the sending voltage, and the loss of active power was 6.8%. After the injection of Hera and Betano diesel power plant the voltage drop only ranges 6%, and the loss of active power can be minimized to 5.3%. The results of power system stability analysis show that the stability of the rotor angle, the frequency stability and the voltage stability during the interruption are more stable after new generator injection being assembled and compared to the state before the new generator injection the recovery system is faster.

Keywords : *Steady State, Dynamic Stability, New Power Plant, Hera Diesel Power Plant Injection, Betano Diesel Power Plant Injection*

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur ke hadirat Tuhan yang maha kuasa, atas kasih karunia-MU penulis dapat menyelesaikan penelitian tesis yang berjudul: “Analisis Injeksi Pembangkit Baru Hera dan Betano pada Sistem Interkoneksi di EDTL Timor Leste”.

Penelitian ini diajukan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi strata dua (S2) dan memperoleh gelar Magister Teknik (M.T) di Program Magister Teknik Elektro Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

Penelitian ini mengambil topik mengenai analisis aliran daya dan stabilitas sistem tenaga yang disebabkan masuknya pembangkit baru (PLTD) Hera dan PLTD Betano kapasitas 250 MW ke dalam sistem kelistrikan Timor Leste, baik pada sistem kelistrikan lama (eksisting 20 kV) Distrik Dili maupun pada sistem kelistrikan 150 kV (sistem baru) dengan 9 gardu induk (*substation*). Masuknya pembangkit baru tersebut akan berdampak langsung terhadap perubahan aliran daya dan kestabilan sistem. Aliran daya yang dianalisis meliputi kondisi sebelum dan sesudah masuknya pembangkit baru. Sedangkan Stabilitas sistem tenaga yang dianalisis meliputi kondisi pada saatnya terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa baik sebelum dan sesudah injeksi pembangkit baru.

Penulis menyadari dalam penelitian ini terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu diharapkan saran dan masukan demi penyempurnaan tesis ini.

Malang, Desember 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
IDENTITAS PENGUJI TESIS.....	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS PENELITIAN TESIS	iv
LEMBAR PERSEMBAHAN	v
RIWAYAT HIDUP	vi
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	ix
KATA PENGANTAR	x
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II LANDASAN TEORI	5
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.2 Analisis Aliran Daya	6
2.2.1 Persamaan Aliran Daya	7
2.2.2 Metode <i>Newton Raphson</i> pada Analisis Aliran Daya	8
2.3 Kestabilan Sistem Tenaga.....	12
2.3.1 Steady-State Stability	12
2.3.2 Transient Stability	13
2.3.3 Dynamic Stability.....	14
2.4 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga.....	15
2.4.1 Kestabilan Sudut Rotor (Rotor Angle Stability)	15
2.4.2 Kestabilan Frekuensi (Frequency Stability)	17
2.4.3 Kestabilan Tegangan (Voltage Stability)	18
2.5 Persamaan Osilasi	19
2.6 Karakteristik Unjuk Kerja Jaringan.....	22

BAB III KERANGKA KONSEP PENELITIAN	27
3.1 Kerangka Pikir	27
3.2 Variabel Penelitian	28
3.3 Hipotesis	29
BAB IV METODE PENELITIAN.....	31
4.1 Diagram Alir Analisis Aliran Daya.....	31
4.2 Diagram Alir Analisis Kestabilan Dinamis	32
4.3 Bahan dan Alat yang Digunakan	34
4.4 Tempat dan Waktu Penelitian.....	34
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN.....	35
5.1 Sistem Distribusi 20 kV Distrik Dili	35
5.1.1 Data Pembangkit di Distrik Dili.....	35
5.1.2 Data Transformator	35
5.1.3 Data Saluran Distrik Dili	35
5.1.4 Data Beban Distrik Dili	36
5.2 Hasil Analisis Aliran Daya Distrik Dili Sistem 20 kV.....	38
5.2.1 Sebelum Injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano.....	38
5.2.2 Setelah Injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano.....	40
5.2.3 Rugi-Rugi Daya (Power Losses) Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano	45
5.3 Sistem Transmisi 150 kV Timor Leste.....	46
5.3.1 Data Generator	47
5.3.2 Data Trafo setiap Gardu Induk	47
5.3.3 Data Saluran Transmisi 150 kV	48
5.3.4 Data Beban setiap Gardu Induk	48
5.4 Hasil Analisis Aliran Daya sesudah Injeksi Pembangkit (Sistem 150 kV).....	49
5.4.1 Injeksi PLTD Betano	50
5.4.2 Injeksi PLTD Hera	51
5.4.3 Injeksi PLTD Betano dan PLTD Hera	52
5.4.4 Rugi-Rugi Daya (Power Losses) untuk Tiga Skenario Injeksi.....	54
5.5 Analisis Kestabilan Sistem Tenaga	55
5.5.1 Kestabilan Sistem Tenaga sebelum Injeksi PLTD Betano.....	55
5.5.2 Kestabilan Sistem sesudah Injeksi PLTD Betano.....	67
5.5.3 Perbandingan Kestabilan Sebelum dan Sesudah injeksi Betano	79
5.6 Waktu Pemutusan Kritis.....	91
5.7 Pengaruh Injeksi Pembangkit Baru Terhadap Daya Generator	93
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	95

6.1	Kesimpulan	95
6.2	Saran	95
DAFTAR PUSTAKA		97
LAMPIRAN		



DAFTAR TABEL

No.	Nama Tabel	Halaman
Tabel 2.1	Nilai Tegangan (%) yang Diiijinkan untuk Berbagai Level Tegangan	23
Tabel 2.2	Nilai Distorsi Harmonisa yang Diiijinkan untuk Berbagai Level Tegangan Sistem.....	23
Tabel 2.3	Waktu Pemutusan Gangguan untuk Berbagai Level Tegangan Sistem	24
Tabel 5.1	Data Panjang Saluran dan Luas Penampang setiap <i>Feeder</i>	36
Tabel 5.2	Perbandingan Nilai Tegangan Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Baru pada Bus yang Mengalami Penurunan Tegangan di <i>Feeder</i> 1 Hasil Simulasi	41
Tabel 5.3	Perbandingan Nilai Tegangan Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Baru pada Bus yang Mengalami Penurunan Tegangan di <i>Feeder</i> 2 Hasil Simulasi	42
Tabel 5.4	Perbandingan Nilai Tegangan Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Baru pada Bus yang Mengalami Penurunan Tegangan di <i>Feeder</i> 6 Hasil Simulasi	44
Tabel 5.5	Perbandingan <i>Total Losses</i> pada Distrik Dili 20 kV Hasil Simulasi.....	45
Tabel 5.6	Data Trafo di setiap Gardu Induk di Timor Leste.....	47
Tabel 5.7	Data Saluran Sistem Kelistrikan 150 kV Timor Leste	48
Tabel 5.8	Data Beban Puncak setiap Gardu Induk	49
Tabel 5.9	Perbandingan Nilai Profil Tegangan untuk Tiga Skenario Injeksi Pembangkit Hasil Simulasi.....	54
Tabel 5.10	Perbandingan Total Losses pada Sistem Kelistrikan Timor Leste Hasil Simulasi.....	54
Tabel 5.11	Perbandingan Kestabilan Sudut Rotor Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Dili Substation)	80
Tabel 5.12	Perbandingan Kestabilan Frekuensi Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Dili Substation)	81
Tabel 5.13	Perbandingan Kestabilan Tegangan Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Dili Substation)	82
Tabel 5.14	Perbandingan Kestabilan Sudut Rotor Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Liquica Substation).....	83
Tabel 5.15	Perbandingan Kestabilan Frekuensi Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Liquica Substation).....	84
Tabel 5.16	Perbandingan Kestabilan Tegangan Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Liquica Substation).....	85
Tabel 5.17	Perbandingan Kestabilan Sudut Rotor Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Manatuto Substation).....	86
Tabel 5.18	Perbandingan Kestabilan Frekuensi Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Manatuto Substation).....	87
Tabel 5.19	Perbandingan Kestabilan Tegangan Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Manatuto Substation).....	88

Tabel 5.20	Perbandingan Kestabilan Sudut Rotor Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Baucau Substation).....	89
Tabel 5.21	Perbandingan Kestabilan Frekuensi Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Baucau Substation).....	90
Tabel 5.22	Perbandingan Kestabilan Tegangan Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Baucau Substation).....	91
Tabel 5.23	Perbandingan Waktu Pemutusan Kritis Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano	93



DAFTAR GAMBAR

No.	Nama Gambar	Halaman
<i>Gambar 2.1</i>	Pemodelan saluran transmisi pada analisis aliran daya.	7
<i>Gambar 2.2</i>	Ilustrasi kategori kestabilan yang terjadi pada sistem tenaga.	15
<i>Gambar 3.1</i>	Diagram alir kerangka konsep penelitian.	27
<i>Gambar 4.1</i>	Diagram alir analisis aliran daya.	32
<i>Gambar 4.2</i>	Diagram alir analisis kestabilan dinamis.	33
<i>Gambar 5.1</i>	Single-line diagram distrik Dili.	37
<i>Gambar 5.2</i>	Grafik tegangan sistem pada <i>feeder</i> 1 sebelum injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano.	38
<i>Gambar 5.3</i>	Grafik tegangan sistem pada <i>feeder</i> 2 sebelum injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano.	39
<i>Gambar 5.4</i>	Grafik tegangan sistem pada <i>feeder</i> 6 sebelum injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano.	40
<i>Gambar 5.5</i>	Grafik tegangan sistem di <i>feeder</i> 1 sebelum dan sesudah injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano.	41
<i>Gambar 5.6</i>	Grafik tegangan sistem di <i>feeder</i> 2 sebelum dan sesudah injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano.	44
<i>Gambar 5.7</i>	Grafik tegangan sistem di <i>feeder</i> 6 sebelum dan sesudah injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano.	45
<i>Gambar 5.8</i>	<i>Single-line diagram</i> sistem kelistrikan Timor Leste 150 KV.	47
<i>Gambar 5.9</i>	Pemodelan sistem kelistrikan Timor Leste 150 kV.	49
<i>Gambar 5.10</i>	Lokasi injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano pada sistem kelistrikan Timor Leste.	50
<i>Gambar 5.11</i>	Profil tegangan pada setiap GI saat injeksi PLTD Betano.	51
<i>Gambar 5.12</i>	Profil tegangan pada setiap GI saat injeksi PLTD Hera.	52
<i>Gambar 5.13</i>	Profil tegangan pada setiap GI saat injeksi PLTD Betano dan PLTD Hera.	53
<i>Gambar 5.14</i>	Profil tegangan untuk tiga skenario injeksi pembangkit.	53
<i>Gambar 5.15</i>	Kestabilan sudut rotor sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Dili Substation).	56
<i>Gambar 5.16</i>	Kestabilan frekuensi sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Dili Substation).	57
<i>Gambar 5.17</i>	Kestabilan tegangan sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Dili Substation).	58
<i>Gambar 5.18</i>	Kestabilan sudut rotor sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Liquica Substation).	59
<i>Gambar 5.19</i>	Kestabilan frekuensi sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Liquica Substation).	60

<i>Gambar 5.20</i>	Kestabilan tegangan sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Liquica Substation).....	61
<i>Gambar 5.21</i>	Kestabilan sudut rotor sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Manatuto Substation).....	62
<i>Gambar 5.22</i>	Kestabilan frekuensi sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Manatuto Substation).....	63
<i>Gambar 5.23</i>	Kestabilan tegangan sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Manatuto Substation).....	64
<i>Gambar 5.24</i>	Kestabilan sudut rotor sebelum injeksi PLTD Betano(fault pada Baucau Substation).....	65
<i>Gambar 5.25</i>	Kestabilan frekuensi sebelum injeksi PLTD Betano(fault pada Baucau Substation).	66
<i>Gambar 5.26</i>	Kestabilan tegangan sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Baucau Substation).....	67
<i>Gambar 5.27</i>	Kestabilan sudut rotor sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Dili Substation).....	68
<i>Gambar 5.28</i>	Kestabilan frekuensi sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Dili substation).	69
<i>Gambar 5.29</i>	Kestabilan tegangan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Dili Substation).	70
<i>Gambar 5.30</i>	Kestabilan sudut rotor sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Liquica Substation).....	71
<i>Gambar 5.31</i>	Kestabilan frekuensi sesudah injeksi PLTD Betano(fault pada Liquica Substation).....	72
<i>Gambar 5.32</i>	Kestabilan tegangan sesudah injeksi PLTD Betano(fault pada Liquica Substation).....	73
<i>Gambar 5.33</i>	Kestabilan sudut rotor sesudah injeksi PLTD Betano(fault pada Manatuto Substation).....	74
<i>Gambar 5.34</i>	Kestabilan frekuensi sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Manatuto Substation).....	75
<i>Gambar 5.35</i>	Kestabilan tegangan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Manatuto Substation).....	76
<i>Gambar 5.36</i>	Kestabilan sudut rotor sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Baucau Substation).....	77
<i>Gambar 5.37</i>	Kestabilan frekuensi sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Baucau Substation).....	78
<i>Gambar 5.38</i>	Kestabilan tegangan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Baucau Substation).....	79
<i>Gambar 5.39</i>	Perbandingan kestabilan sudut rotor sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Dili Substation).	80
<i>Gambar 5.40</i>	Perbandingan kestabilan frekuensi sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Dili Substation).	81

<i>Gambar 5.41</i>	Perbandingan kestabilan tegangan sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Dili Substation).	82
<i>Gambar 5.42</i>	Perbandingan kestabilan sudut rotor sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Liquica Substation).	83
<i>Gambar 5.43</i>	Perbandingan kestabilan frekuensi sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Liquica Substation).	84
<i>Gambar 5.44</i>	Perbandingan kestabilan tegangan sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Liquica Substation).	85
<i>Gambar 5.45</i>	Perbandingan kestabilan sudut rotor sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Manatuto Substation).	86
<i>Gambar 5.46</i>	Perbandingan kestabilan frekuensi sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault Mantuto Substation).	87
<i>Gambar 5.47</i>	Perbandingan kestabilan tegangan sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Manatuto Substation).	88
<i>Gambar 5.48</i>	Perbandingan kestabilan sudut rotor sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Baucau Substation).	89
<i>Gambar 5.49</i>	Perbandingan kestabilan frekuensi sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Baucau Substation).	90
<i>Gambar 5.50</i>	Perbandingan kestabilan tegangan sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Baucau Substation).	91
<i>Gambar 5.51</i>	Grafik waktu pemutusan kritis sudut rotor sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Dili Substation).	92
<i>Gambar 5.52</i>	Grafik waktu pemutusan kritis sudut rotor sesudah injeksi PLTD Betano (fault Dili Substation).	92
<i>Gambar 5.53</i>	Grafik daya aktif generator sebelum dan sesudah injeksi pembangkit baru.	94
<i>Gambar 5.54</i>	Grafik daya reaktif generator sebelum dan sesudah injeksi pembangkit baru.	94

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Timor Leste adalah negara baru yang berbentuk republik, sebagian besar wilayahnya merupakan pegunungan yang memiliki luas wilayah sebesar 15.410 km² dengan jumlah penduduk 1.143.667 jiwa yang tersebar di 13 *district* (provinsi) dan Dili sebagai Ibukota Negara. Kebutuhan energi listrik di Timor Leste sejak tahun 2002 merdeka sampai tahun 2011 terus meningkat. Ketersediaan pembangkit-pembangkit belum bisa memenuhi kebutuhan konsumen listrik, sehingga diperlukan pembangkit energi listrik yang memiliki kapasitas daya besar.

Sistem kelistrikan di Timor Leste dari tahun 2002 sampai dengan tahun 2011 memiliki pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) dengan jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV yang terpisah antara satu *district* (provinsi) dengan *district* yang lain. Biaya operasionalnya menjadi mahal dan hanya mampu beroperasi antara 6 jam, 8 jam dan 12 jam dalam sehari. Kapasitas PLTD di 13 *district* mulai dari kapasitas daya terkecil sebesar 200 kW yang berada di *district* Viqueque sampai dengan kapasitas daya terbesar 36.532 kW yang berada di *district* Dili. Sedangkan kapasitas beban di masing-masing *district* mulai dari 99 kW (*district* Liquica); 125 kW (*district* Ainaro); 200 kW (*district* Oecusse); 236 kW (*district* Viqueque); 300 kW (*district* Aileu); 319 kW (*district* Manatuto); 420 kW (*district* Same); 668 kW (*district* Ermera); 680 kW (*district* Lospalos); 681 kW (*district* Baucau); 1025 kW (*district* Maliana); dan 22.314 kW (*district* Dili). Pada beberapa *district* mengalami kekurangan pasokan energi listrik dari masing-masing pembangkit, seperti di *district* Aileu sebesar 20 %, di *district* Same sebesar 3 %, di *district* Lospalos sebesar 65 % dan di *district* Viqueque sebesar 15 % (EDTL, 2009).

Untuk memenuhi kekurangan pasokan energi listrik dan penyaluran energi listrik sampai ke pelosok daerah terpencil, pemerintahan Timor Leste pada tahun 2009 membangun pembangkit tenaga listrik berdaya besar secara terpusat yaitu pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) Hera di *district* Dili kapasitas daya sebesar 120 MW dan PLTD Betano di *district* Same kapasitas daya sebesar 130 MW. PLTD ini akan diinjeksikan pada sistem kelistrikan Timor Leste melalui saluran transmisi 150 kV dan 9 Gardu Induk (GI), yaitu GI Dili, GI Liquica, GI Maliana, GI Suai, GI Betano, GI Manatutu, GI Baucau, GI Lospalos

dan GI Viqueque. Dengan adanya sistem interkoneksi 150 kV tersebut, maka sistem pembangkitan dengan jaringan distribusi 20 kV yang terpisah antara *district* satu dengan yang lainnya telah tergantikan dengan sistem interkoneksi melalui saluran transmisi 150 kV menjadi satu kesatuan sistem interkoneksi di Timor Leste.

Adanya injeksi pembangkit baru (PLTD Hera dan PLTD Betano) pada sistem kelistrikan Timor Leste ini menyebabkan adanya perubahan aliran daya yang terdapat pada sistem. Hal ini juga akan menyebabkan ketidakstabilan pada sistem yang harus segera diperbaiki. Dengan adanya injeksi tersebut, diperlukan adanya analisis untuk mengetahui apa yang terjadi ketika injeksi pembangkit baru ini dilakukan. Dalam rangka membuat kestabilan sistem agar mampu beroperasi dan melakukan sinkronisasi sewaktu ada gangguan, maka diperlukan juga strategi yang paling baik dan optimal. Analisis aliran daya yang akan dilakukan adalah analisis *steady state* dan analisis dinamis. Sedangkan pada analisis dinamis tersebut dilakukan penstabilan tegangan, frekuensi, dan sudut rotor. Hal ini dilakukan baik sebelum terjadi injeksi maupun setelah terjadi injeksi. Diharapkan ke depannya performa sistem terutama sewaktu terjadi gangguan bisa diketahui.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mendesain sistem interkoneksi terbaik dengan adanya penambahan pembangkit Hera dan Betano bila ditinjau dari segi *steady state* dan dinamik
2. Bagaimana pengaruh masuknya pembangkit Hera dan Betano terhadap sistem ditinjau dari kondisi *steady state* dan dinamik.

1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan tidak meluas, maka ruang lingkup pembahasan pada penelitian ini meliputi:

1. Penelitian dilakukan pada sistem kelistrikan Timor Leste 150 kV dan sistem eksisting 20 kV Distrik Dili (Dili Substation).
2. Analisis *steady state* dilakukan dengan studi aliran daya sebelum dan sesudah injeksi pembangkit baru ke dalam sistem.

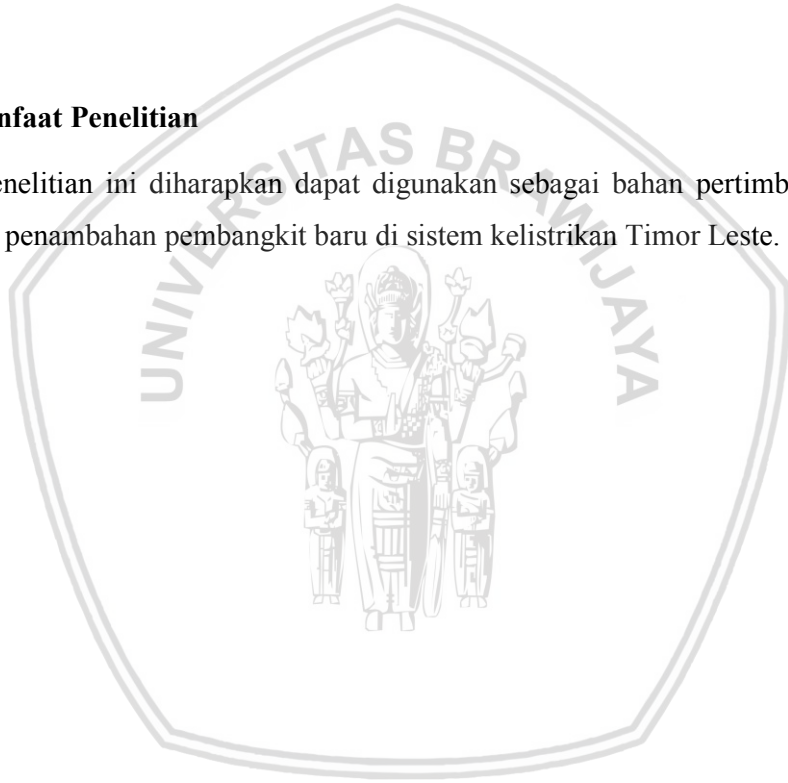
3. Analisis *load flow* dilakukan menggunakan metode *newton raphson* yang terdapat pada *software ETAP*.
4. Analisis dinamik berupa kestabilan tegangan, kestabilan frekuensi dan kestabilan sudut rotor pada saat terjadinya gangguan hubung singkat tiga fasa.
5. Tidak membahas faktor ekonomi.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis performansi sistem akibat masuknya pembangkit listrik Hera dan Betano ke sistem, ditinjau dari perspektif *steady state* dan dinamik.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam perancangan penambahan pembangkit baru di sistem kelistrikan Timor Leste.





BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Kumara, Penangsang dan Aryani (2016) dalam jurnalnya menyatakan bahwa sistem tenaga listrik yang baik harus mampu memenuhi syarat berikut: beban harus terlayani tanpa putus, tegangan sistem harus mendekati nominal, dan frekuensi sistem harus berada pada batas yang diijinkan. Segala macam fluktuasi yang terjadi, baik itu tegangan maupun frekuensi, harus berada dalam batas sesuai spesifikasi. Pada dasarnya, beban yang ada akan berfluktuasi sesuai dengan permintaan, dan harus mampu untuk dipenuhi tanpa menyebabkan pengaruh pada kestabilan sistem.

Sebuah sistem tenaga listrik harus mampu melakukan adaptasi penggerak pada generator, sehingga beban yang bervariasi tersebut akan mampu diimbangi oleh pemenuhan daya dari generator tersebut.

Mengutip pernyataan Surusa, Suyono dan Wijono (2016) menyatakan bahwa injeksi pembangkit baru pada sistem akan dengan segera mempengaruhi keseimbangan sistem. Beberapa faktor yang akan menjadi keluar dari keseimbangannya adalah sudut rotor, tegangan, dan frekuensi sistem. *Rotor angle stability* berhubungan dengan sudut fasa, sedangkan *frequency stability* berpengaruh pada frekuensi sistem, dan *voltage stability* mempengaruhi tegangan pada sistem. Dengan adanya injeksi generator tersebut, maka perlu dilakukan analisis dan evaluasi pada sistem tenaga listrik secara terintegrasi. Strategi ini dilakukan agar sistem tetap bekerja pada batas spesifikasi saat terjadi injeksi generator baru.

Suyono dan Zainuddin dalam jurnal yang berjudul *Injection Impact of Photovoltaic Distributed Generation (PVDG) on Power Distribution System Stability* pada tahun 2015 menganalisis pemodelan PVDG dan optimasi pencarian lokasi injeksi dan kapasitas daya PVDG menggunakan metode algoritma genetika. Hasil optimasi menemukan 8 lokasi dengan total kapasitas PVDG sebesar 3,32 MW yang digunakan untuk meminimalisir rugi-rugi daya dan penurunan tegangan. Hasilnya rugi-rugi daya dapat diminimalisir dari 13,15% turun menjadi 1,30% dan penurunan tegangan dari 25% menjadi -8,5%.

2.2 Analisis Aliran Daya

Dalam bidang sistem tenaga listrik, diperlukan suatu analisis agar informasi tegangan dan daya (termasuk keseimbangannya) dapat diambil ketika sistem bekerja normal dan konstan (*steady state*). Performa sistem tenaga dapat dievaluasi dan dianalisis baik pada posisi sumber (pembangkitan – *generation*) maupun pada posisi tujuan (beban – *load*). Selain itu, informasi aliran daya pada berbagai kondisi (normal ataupun *emergency*) juga diperlukan pada analisis ini. (Cekdin, 2007)

Terdapat cakupan pada permasalahan aliran daya ini, yang meliputi profil tegangan, profil arus, profil daya aktif, dan profil daya reaktif pada beberapa bus yang terdapat pada sistem jaringan pada keadaan operasional yang normal.

Terdapat tiga klasifikasi bus dalam analisis aliran daya, antara lain:

1. Bus referensi (*slack* atau *swing bus*)

V dan δ (sudut fasa) merupakan variabel yang diketahui di dalam bus referensi. Selama perhitungan aliran daya, besaran V dan δ akan tetap dan tidak berubah. *Slack bus* berfungsi agar kekurangan daya yang berupa beban dan rugi-rugi dapat dipenuhi, karena rugi-rugi saluran hanya dapat diketahui setelah dilakukan perhitungan.

2. Bus generator (*voltage controlled bus*)

Pada *voltage controlled bus* atau bus generator, besaran P dan V sudah diketahui.

3. Bus beban (*load bus*)

Pada bus beban, besaran P dan Q sudah diketahui.

Terdapat empat variabel pada masing-masing bus, yaitu:

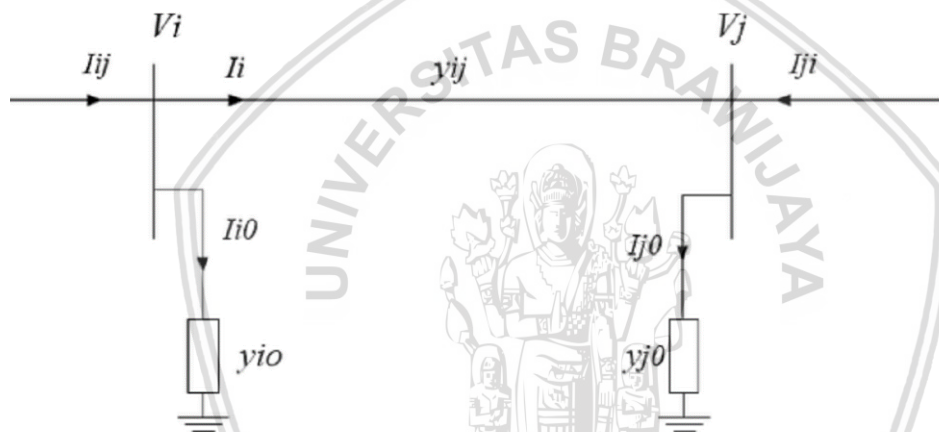
1. Daya aktif (P)
2. Daya reaktif (Q)
3. Nilai skalar tegangan ($|V|$)
4. Pergeseran sudut fasa tegangan (δ)

Terdapat dua variabel independen pada setiap bus, sedangkan dua variabel lainnya merupakan variabel dependen. Pada bus referensi, variabel independen meliputi nilai skalar tegangan serta pergeseran sudut fasa tegangan. Pada bus generator, variabel independen

meliputi daya nyata dan nilai skalar tegangan. Sedangkan pada bus beban, variabel independen adalah daya nyata dan daya reaktif. Dalam hal ini, bus referensi berfungsi untuk memasok daya nyata dan daya reaktif ketika terjadi kekurangan kedua jenis daya tersebut pada sistem.

2.2.1 Persamaan Aliran Daya

Pada Gambar 2.1 ditunjukkan suatu contoh model jaringan pada sistem tenaga listrik, yang mana setiap saluran direpresentasikan dengan model π dengan perubahan yang telah dilakukan pada impedansinya sehingga telah menjadi admintansi pada per unit dengan satuan dasarnya adalah MVA. Persamaan (2-1) dan Persamaan (2-2) menyatakan daya aktif dan daya reaktif yang terjadi pada bus i .



Gambar 2.1 Pemodelan saluran transmisi pada analisis aliran daya.

Sumber : Cekdin, 2007.

Pada Gambar 2.1 tersebut terdapat saluran yang menghubungkan bus i dengan bus j . Pada bus i , arus saluran I_{ij} yang terukur diberi tanda positif untuk arus dari i menuju j . Persamaan (2-3) menunjukkan besar nilai arus I_{ij} tersebut.

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad \text{.....(2-1)}$$

$$I = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad \text{.....(2-2)}$$

$$I_{ij} = I_i + I_{i0} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0}V_i \quad \text{.....(2-3)}$$

Dengan:

I_i = arus pada saluran antara bus i dan bus j

I_{i0} = arus pada saluran *half line charging*

- y_{ij} = Admitansi saluran antara bus i dan bus j
 y_{i0} = *Half line charging*
 V_i = Tegangan bus i
 V_j = Tegangan bus j

Sedangkan pada bus j , arus saluran I_{ij} yang terukur akan diberi tanda positif untuk arus dari j ke i , yang dinyatakan pada Persamaan (2-4).

$$I_{ji} = -I_i + I_{j0} = y_{ij} (V_j - V_i) + y_{j0} V_j \dots \dots \dots (2-4)$$

Persamaan (2-5) dan Persamaan (2-6) menyatakan daya kompleks S_{ij} pada bus i menuju bus j , serta daya kompleks S_{ji} pada bus j menuju i .

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \dots \dots \dots (2-5)$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \dots \dots \dots (2-6)$$

Persamaan (2-3) dan Persamaan (2-4) merupakan jumlahan rugi-rugi daya pada saluran i - j , sehingga akhirnya bisa dinyatakan menggunakan Persamaan (2-7).

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \dots \dots \dots (2-7)$$

Persamaan (2-8) adalah cara untuk menghitung jumlahan rugi saluran pada sistem, di mana memiliki sejumlah n bus.

$$S_{LT} = \sum_i^n = 1 \sum_j^n = 1 S_{Lij} \dots \dots \dots (2-8)$$

Dengan:

- S_{LLj} = *Losses* yang terjadi pada saluran bus i dengan bus j .
 S_{LT} = Jumlahan dari kerugian daya pada sistem.

2.2.2 Metode *Newton Raphson* pada Analisis Aliran Daya

Masalah aliran daya dapat diselesaikan dengan metode *Newton-Raphson* menggunakan sejumlah persamaan nonlinier untuk menyatakan daya aktif dan reaktif. Dalam metode ini, persamaan aliran daya dapat dituliskan menggunakan bentuk polar. Persamaan (2-9) merupakan persamaan daya pada suatu bus i (Saadat, 1999).

$$I_i = \sum_{j=1}^n V_{ij} V_j \dots \dots \dots (2-9)$$

Bentuk polar dari Persamaan (2-9) ditunjukkan pada Persamaan (2-10).

$$I_j = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

Sedangkan Persamaan (2-11) menyatakan daya kompleks yang terjadi pada bus i .

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad \dots\dots\dots (2-11)$$

Persamaan (2-12) merupakan hasil substitusi Persamaan (2-10) untuk I_i menuju Persamaan (2-11).

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad \dots\dots\dots (2-12)$$

Ketika bagian riil dan imajiner dipisahkan, maka akan diperoleh Persamaan (2-13) dan Persamaan (2-14).

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad \dots\dots\dots (2-13)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad \dots\dots\dots (2-14)$$

Persamaan aljabar nonlinier terbentuk pada Persamaan (2-13) dan Persamaan (2-14) yang berisi variabel mandiri. Untuk setiap variabel, nilainya akan dinyatakan menggunakan satuan per unit, sedangkan satuan radian digunakan pada sudut fasa. Persamaan (2-15) merupakan asal deret Taylor yang membentuk Persamaan (2-13) dan Persamaan (2-14).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2-15)$$

Matrik *Jacobian* yang terbentuk pada Persamaan (2-15) menunjukkan perbandingan linier, di mana hal tersebut terjadi pada perubahan besarnya tegangan $\Delta |V_i^{(k)}|$ dan perubahan

sudut tegangan $\Delta\delta_i^{(k)}$, dengan perubahan tak-signifikan pada daya aktif $(\Delta P_i^{(k)})$ dan daya reaktif $(\Delta Q_i^{(k)})$. Persamaan (2-16) merupakan bentuk singkat dari Persamaan (2-15).

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 J_2 \\ J_3 J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2-16)$$

Banyaknya elemen matrik *jacobian* dari Persamaan (2-16) ditentukan dengan $(2n-2-m) \times (2n-2-m)$, di mana n merupakan banyaknya bus yang terdapat pada sistem, dan m merupakan banyaknya bus generator pada sistem. Nilai J_1 diambil dari $(n-1) \times (n-1)$, kemudian nilai J_2 didapatkan dari $(n-1) \times (n-1-m)$, sedangkan nilai J_3 diambil dari $(n-1-m) \times (n-1)$, dan nilai J_4 didapatkan dari $(n-1-m) \times (n-1-m)$.

Untuk $j \neq 1$, elemen diagonal dan diagonal luar untuk J_1 dinyatakan pada Persamaan (2-17) dan Persamaan (2-18).

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq 1} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (2-17)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (2-18)$$

Sedangkan untuk $j \neq 1$, Persamaan (2-19) dan Persamaan (2-20) menyatakan elemen diagonal serta elemen diagonal luar untuk J_2 .

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = 2|V_i| |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + \sum_{j \neq 1} |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (2-19)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (2-20)$$

Tetap pada $j \neq 1$, elemen bagian diagonal serta elemen bagian diagonal luar untuk J_3 dinyatakan dengan Persamaan (2-21) dan Persamaan (2-22).

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq 1} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (2-21)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_{ji}} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (2-22)$$

Terakhir pada $j \neq 1$, elemen bagian diagonal serta elemen bagian diagonal luar untuk J_4 dinyatakan dengan Persamaan (2-23) dan Persamaan (2-24).

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i||Y_{ii}|\sin\theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-23)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-24)$$

Nilai $\Delta P_i^{(k)}$ serta $\Delta Q_i^{(k)}$ memiliki perbedaan antara nilai yang dijadwalkan dengan nilai hasil kalkulasi. Sisa daya merupakan sebutan untuk hal tersebut, di mana Persamaan (2-25) dan Persamaan (2-26) menyatakan cara untuk mendapatkan sisa daya tersebut.

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (2-25)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (2-26)$$

Persamaan (2-27) dan Persamaan (2-28) merupakan kalkulasi baru bagi sudut fasa serta tegangan bus.

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2-27)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (2-28)$$

Dengan:

$$|V_i^{(k+1)}| = \text{Nilai magnitudo tegangan baru.}$$

$$\Delta |V_i^{(k)}| = \text{Nilai pembetulan tegangan.}$$

$$\Delta \delta_i^{(k+1)} = \text{Sudut fasa dari tegangan baru.}$$

$$\Delta \delta_i^{(k)} = \text{Sudut fasa dari tegangan lama.}$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = \text{Nilai korelasi dari sudut fasa tegangan.}$$

Prosedur penyelesaian proses iteratif ini akan dihentikan bila nilai konvergen (ϵ) telah memenuhi Persamaan (2-29) dan Persamaan (2-30).

$$\Delta P_i^{(k)} \geq \epsilon \quad (2-29)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} \geq \epsilon \quad (2-30)$$

2.3 Kestabilan Sistem Tenaga

Secara umum, kestabilan sistem tenaga terbagi menjadi dua, yaitu:

1. *Steady-State Stability*

Kestabilan ini merupakan kemampuan mempertahankan kondisi operasional normal yang dimiliki sistem tenaga listrik ketika terjadi gangguan kecil dan bersifat lambat (contohnya perubahan beban secara pelan-pelan).

2. *Transient Stability*

Kestabilan ini dimiliki oleh sistem tenaga listrik yang mampu mengembalikan kondisi operasional normal ketika terjadi gangguan relatif besar, seperti gangguan hilang beban besar, hilang generator besar, ataupun terjadi hubung singkat skala besar (Saadat, 2009).

2.3.1 Steady-State Stability

Steady-state stability, atau disebut kestabilan keadaan tunak, didefinisikan sesuai dengan spesifikasi pada transmisi, beban, dan generator. Dalam hal ini, terdapat batasan pada daya yang dihantarkan pada sistem transmisi, yang berkenaan dengan kemampuan maksimum (batas atas) kuat arus, tegangan, dan frekuensi yang ditransmisikan. Selain itu, kemampuan maksimum generator juga diperhitungkan, yang mengikuti dari jangkauan beban yang mungkin diminta oleh konsumen.

Perangkat pengendali otomatis pada generator akan melakukan koreksi, di mana ketika beban naik maka rotasi rotor akan melambat sehingga dilakukan koreksi penambahan torsi pada prime mover agar kecepatan rotasi rotor bisa dikembalikan, dan sebaliknya bila beban berkurang. Pada proses koreksi tersebut, akan terjadi *overshoot*, di mana reaksi atas kondisi terjadi secara berlebihan. Maka dari itu bila fenomena ini tidak dikendalikan dengan benar, akan terjadi *overshoot* yang kedua dan seterusnya yang disebut dengan osilasi. Sistem kendali yang baik akan melakukan koreksi dengan nilai yang mengacu pada kesalahan dan laju perubahan percepatan sehingga osilasi bisa ditekan dalam batas yang diijinkan.

Osilasi pada kondisi tersebut akan sangat cepat hingga tidak sempat untuk diperbaiki oleh governor pada generator. Sistem eksitasi pada generator yang responsif (*exciter* dan *voltage regulator* pada generator) akan menjadi terlalu peka terhadap perubahan tegangan sistem yang menyebabkan osilasi kecepatan sudut rotor, yang pada akhirnya akan memperbesar atau menurunkan masukan torsi generator, sehingga akan mempengaruhi

kecepatan rotor dalam pencapaian kondisi stabil operasional. Kondisi tersebut akan terjadi pada sistem tenaga listrik karena permintaan beban yang pasti akan bervariasi terhadap waktu. Semua generator pada sistem interkoneksi harus mampu menyesuaikan energi masukan, sudut rotor, dan eksitasi agar mampu beradaptasi dengan permintaan beban yang bervariasi tersebut.

2.3.2 Transient Stability

Terdapat kondisi yang sangat ekstrim di mana terjadi hilangnya generator yang relatif besar, hilangnya beban dalam volume besar, atau terjadi gangguan skala besar pada transmisi. *Transient stability* merupakan kemampuan sistem untuk bertahan pada kondisi ekstrim seperti disebutkan di atas. Sebelum governor dari masing-masing generator mampu bereaksi atas kondisi ekstrim tersebut, *transient stability* harus mengambil alih agar sistem tetap pada kondisi sinkron dan bertahan terhadap kejutan keseimbangan sistem.

Bila terjadi kehilangan generator skala besar atau beban besar secara tiba-tiba, maka keseimbangan sistem akan segera terganggu. Energi masukan elektrik dan energi keluaran elektrik akan menjadi tidak seimbang, sehingga akan mengganggu kestabilan sistem. Bila energi masukan tidak mampu mencukupi beban yang diminta, maka rotor generator yang masih bekerja akan secara cepat melambat, sebagai akibat pembebanan di luar kemampuan generator. Sedangkan bila beban besar hilang tiba-tiba, maka energi masukan akan melebihi beban yang diminta, sehingga rotor generator akan berputar menjadi lebih cepat.

Ada berbagai masalah yang berpengaruh terhadap kestabilan sistem, contohnya kekuatan pada jaringan transmisi di dalam sistem serta saluran pada sistem yang sangat dekat, karakteristik yang terdapat pada unit generator (termasuk inersia rotor dan *transient reactance*), dan ciri khas kepadatan medan magnet pada besi stator maupun rotor generator. Selain itu, terdapat faktor penting lainnya, yakni kecepatan pada saluran untuk memutus (*disconnect*) dan dengan menyambungkan kembali secara otomatis. Hal ini akan menentukan seberapa cepat sistem dapat mencapai keadaan seimbang dan sinkron kembali. Seperti pada *steady state stability*, kecepatan respons sistem eksitasi generator adalah hal yang sangat vital untuk mendapatkan *transient stability*. Gangguan yang terjadi pada sistem akan diikuti oleh tegangan yang berubah-ubah secara cepat pada sistem. Pemulihan kembali secepatnya menuju kondisi normal adalah hal yang sangat penting dalam membuat kestabilan tetap bertahan.

Secara umum, osilasi pertama yang terjadi pada rotor generator akan terjadi sekitar satu detik setelah terjadinya gangguan, namun waktu tunda aktual akan sangat bergantung pada karakteristik generator dan sistem transmisi. Umumnya sekitar empat hingga lima detik akan tercapai keseimbangan dan kestabilan setelah reaksi dari governor generator. Osilasi yang dinamis akan sangat dipengaruhi oleh ayunan tegangan, penguatan pada sistem eksitasi, dan frekuensi jaringan.

2.3.3 Dynamic Stability

Pada sisi generator, governor akan melakukan reaksi guna menaikkan atau menurunkan pasokan daya setelah terjadi gangguan. Hal ini terjadi disesuaikan dengan kondisi ketidakseimbangan yang terjadi, sebagai respons sistem kendali yang ada pada generator. Waktu reaksi governor umumnya sekitar 1,5 detik setelah terdeteksinya indikasi gangguan yang terjadi. Periode antara reaksi governor generator dengan terjadinya kondisi *steady-state* merupakan periode karakteristik efektifitas *dynamic stability* (kestabilan dinamis). Kemampuan sistem dalam menjaga kondisi sinkron setelah osilasi pertama (periode *transient stability*) hingga tercapai kondisi keseimbangan baru disebut *dynamic stability*.

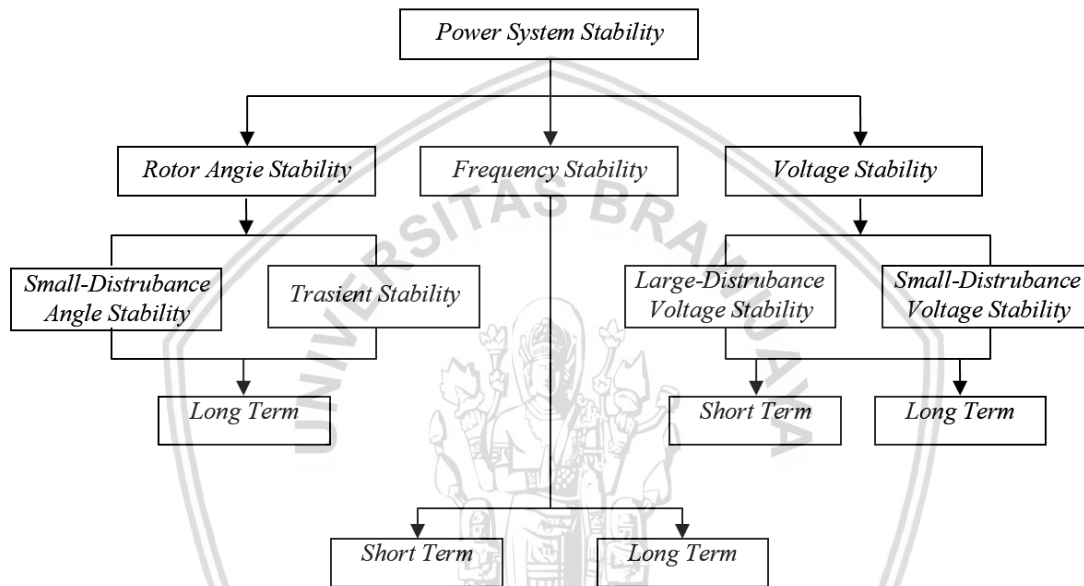
Dalam periode ini, governor generator akan melakukan pembukaan atau penutupan katup masukan energi seperlunya untuk menaikkan atau menurunkan energi masukan pada penggerak utama dan operasi pengendalian saluran guna membalikkan pasokan daya menuju saluran pada kondisi normal. Pada umumnya jika governor generator sangat sensitif terhadap kondisi penurunan kecepatan putar, governor tersebut akan bereaksi untuk menambah bukaan katup guna membuat aliran uap berlebih (pada turbin uap) atau aliran air berlebih (pada turbin air) serta memberikan cukup pasokan energi untuk melawan penurunan kecepatan putar rotor dan meningkatkan kecepatan sistem agar kembali ke kondisi normal. Hal ini masih berupa kondisi yang tidak berimbang karena energi masukan akan melebihi beban sehingga terjadi ketidakseimbangan, sehingga terjadi *overshoot* yang diikuti oleh osilasi sebagai respons yang berlebihan. Agar sistem menuju kestabilan dinamis, osilasi harus diredam dengan melakukan pengurangan pada kekuatan respons dan memasukkan parameter laju perubahan kecepatan sebagai faktor penyeimbang.

Kondisi ini disebut stabil secara transient namun tidak stabil secara dinamis, yang mungkin terjadi bila setelah terjadi gangguan rotor pada generator sistem akan mengalami osilasi pertama sebelum governor bereaksi, dan setelah sistem kendali mulai merespons, osilasi akan bertambah tinggi hingga generator berada dalam kondisi tidak sinkron. Hal ini

akan terjadi jika respons sistem kendali governor terjadi akibat adanya *demand* untuk menambah atau mengurangi daya masukan terdapat penundaan dalam orde detik, sehingga reaksi tersebut justru akan menambah osilasi berikutnya hingga terjadi ringing.

2.4 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga

Gambar 2.2 menunjukkan klasifikasi kestabilan sistem tenaga yang dapat dibedakan menjadi tiga kategori, yakni kestabilan frekuensi, kestabilan sudut rotor, dan kestabilan tegangan.



Gambar 2.2 Ilustrasi kategori kestabilan yang terjadi pada sistem tenaga.

Sumber : Kundur, dkk., 2004.

2.4.1 Kestabilan Sudut Rotor (Rotor Angle Stability)

Kestabilan sudut rotor adalah kemampuan generator agar sinkronisasi dari sistem tenaga yang saling terkoneksi akan dipertahankan setelah terjadinya gangguan. Ketidakstabilan dan ketidakseimbangan tersebut akan menyebabkan peningkatan sudut osilasi, yang pada beberapa jenis generator akan mengakibatkan kesulitan untuk sinkronisasi dengan generator lain dalam sistem. Hal ini sangat tergantung pada kemampuan governor generator mempertahankan keseimbangan torsi elektromagnetik dan torsi mekanik antar generator dalam sistem tenaga listrik.

Masalah kestabilan sudut rotor melibatkan studi tentang osilasi elektromekanis terkait dalam sistem tenaga. Faktor fundamental dalam masalah ini adalah cara di mana *output* daya dari mesin sinkron yang bervariasi sebagai perubahan sudut rotornya. Di bawah kondisi

steady-state, ada keseimbangan antara *input* torsi mekanis dan *output* torsi elektromagnetik dari setiap generator dan mempertahankan kecepatan yang selalu konstan. Jika terdapat gangguan pada sistem ini, keseimbangan ini *upset*, sehingga percepatan atau perlambatan rotor dari mesin sesuai dengan hukum gerak berputar tubuh. Jika satu generator sementara berjalan lebih cepat daripada yang lain bahwa posisi relatif untuk sudut rotor dari mesin yang lebih lambat akan maju. Yang dihasilkan bagi transfer perbedaan sudut beban dari generator lambat untuk generator cepat tergantung pada hubungan antara sudut dan daya. Hal ini cenderung mengurangi perbedaan kecepatan dan karenanya terjadi pemisahan sudut. Hubungan sudut-daya sangat nonlinier. Di luar batas tertentu peningkatan dalam pemisahan sudut disertai dengan penurunan dalam transfer daya tersebut bahwa pemisahan sudut meningkat lebih lanjut. Hasil ketidakstabilan jika sistem tidak bisa menyerap energi kinetik yang sesuai untuk perbedaan kecepatan rotor. Untuk setiap situasi tertentu kestabilan sistem tergantung pada apakah ada atau tidak penyimpangan dalam posisi sudut hasil dalam memulihkan torsi rotor. Kehilangan sinkronisme dapat terjadi antara satu mesin dan sisanya dari sistem atau antara kelompok mesin dengan sinkronisme dipertahankan dalam masing-masing kelompok setelah memisahkan dari satu sama lain.

Berkaitan pada kemampuan dari sistem tenaga dalam membuat bertahannya sinkronisme di bawah gangguan minor. Gangguan dianggap cukup kecil sehingga persamaan sistem yang linearisasi diperbolehkan untuk tujuan analisis (Kundur, dkk., 2004).

1. Kestabilan gangguan-kecil akan sangat bergantung pada keadaan awal operasi dari sistem. Kondisi tidak stabil yang dapat dilihat bisa dari dua bentuk : i) peningkatan sudut rotor melalui modus *non oscillatory* atau *aperiodic* karena kurangnya sinkronisasi torsi, ii) peningkatan osilasi rotor karena kurangnya amplitudotorsi redaman yang cukup.
2. Dalam sistem tenaga sekarang ini, masalah kestabilan sudut rotor gangguan-kecil biasanya berhubungan dengan osilasi rendam cukup. Masalah ketidakstabilan *aperiodic* sebagian besar telah dihilangkan dengan menggunakan regulator tegangan generator yang bertindak terus menerus; namun, masalah ini masih bisa terjadi ketika generator beroperasi dengan eksitasi konstan ketika dikenakan tindakan pembatas eksitasi (pembatas arus medan).
3. Masalah kestabilan sudut rotor gangguan-kecil dapat menjadi baik masalah lokal atau global. Masalah lokal melibatkan sebagian kecil dari sistem tenaga dan

biasanya terkait dengan osilasi sudut rotor pembangkit listrik tunggal terhadap seluruh sistem tenaga. Seperti osilasi yang disebut osilasi mode pembangkit lokal. Kestabilan (redaman) dari osilasi ini tergantung pada kekuatan dari sistem transmisi seperti yang terlihat pada pembangkit listrik, sistem kontrol eksitasi generator dan *output* pembangkit.

4. Masalah global yang disebabkan oleh interaksi antara kelompok generator besar dan memiliki efek luas. Mereka melibatkan osilasi dari sekelompok generator di daerah lain. Osilasi seperti ini disebut modus osilasi *interarea*. Karakteristik mereka sangat kompleks dan berbeda signifikan dari modus osilasi pembangkit lokal. Karakteristik beban khususnya memiliki pengaruh besar pada kestabilan mode *interarea*.
5. Kerangka waktu dari maksud studi kestabilan gangguan-kecil adalah pada 10 detik sampai 20 detik berikut gangguan.

2.4.2 Kestabilan Frekuensi (Frequency Stability)

Kestabilan frekuensi adalah kemampuan yang dimiliki sistem tenaga agar bisa membuat frekuensi bertahan pada batas kestabilan sistem. Batas ini merupakan batas di mana akan terjadi keseimbangan antara generator dan beban. Faktor yang mempengaruhi batas ini adalah kemampuan untuk mempertahankan keseimbangan di dalam sistem antara pembangkitan dengan beban, dengan adanya kehilangan beban minimal secara insidental. Ketidakstabilan ini bisa menyebabkan osilasi frekuensi yang pada akhirnya dapat memutus unit generator ataupun beban.

Secara umum, *upset* dari sistem akan menyebabkan perubahan signifikan pada frekuensi, daya, arus, tegangan, dan variabel sistem lainnya. Oleh karena itu, respon proses, kendali, dan proteksi sangat penting untuk dimodelkan dalam kestabilan transien konvensional atau studi kestabilan tegangan. Beberapa proses ini bisa terjadi sangat lambat, contohnya pada *boiler*, atau hanya akan terpicu pada kondisi sistem yang sangat ekstrim, seperti putusnya generator oleh sistem proteksi. Dalam sistem tenaga yang besar dan bersifat interkoneksi, kondisi ini paling sering dihubungkan dengan ketentuan pembagian sistem ke dalam *island*.

Kestabilan dalam hal ini adalah pernyataan tentang apakah setiap *island* akan mencapai keadaan kesetimbangan operasi dengan kerugian beban minimal yang tidak disengaja atau tidak. Hal ini ditentukan oleh respons keseluruhan pulau tersebut yang dibuktikan dengan mean frekuensi, daripada gerak relatif dari mesin. Umumnya masalah kestabilan frekuensi

yang terkait dengan kekurangan dalam koordinasi respons peralatan, miskin kontrol dan pengaman peralatan, atau cadangan pembangkit yang tidak cukup. Selama pergerakan frekuensi, waktu karakteristik dari proses dan perangkat yang diaktifkan akan berkisar dari fraksi detik sesuai dengan respons dari perangkat seperti beban *under frequency shedding* dan kontrol generator dan pengaman, hingga beberapa menit sesuai dengan respons dari perangkat seperti penggerak utama sistem pasokan energi dan regulator tegangan beban. Oleh karena itu, kestabilan frekuensi bisa merupakan fenomena jangka pendek maupun fenomena jangka panjang. Sebuah contoh dari ketidakstabilan frekuensi dalam jangka pendek adalah pembentukan *undergenerated island* dengan cukup *underfrequency load shedding* seperti frekuensi yang meluruh cepat yang menyebabkan pemadaman *island* dalam beberapa detik. Pada sisi lain terjadi situasi yang lebih rumit di mana frekuensi yang tidak stabil diakibatkan oleh kendali yang berlebihan pada turbin uap atau pengaman *boiler* atau reaktor dan kendali fenomena jangka panjang pada kerangka waktu *interest* mulai dari sepuluh detik sampai skala menit. Selama pergerakan frekuensi, nilai tegangan bisa berubah drastis, terutama untuk situasi *islanding* pada *under frequency load shedding* yang membuat sistem tanpa beban. Perubahan nilai tegangan yang kemungkinan lebih besar dalam persentase dari perubahan frekuensi akan mempengaruhi keseimbangan pada beban dan generator. Tegangan tinggi dapat menyebabkan generator yang diinginkan *tripping* oleh buruk rancangan atau kehilangan koordinasi relay eksitasi atau relay *volt/hertz*. Dalam sebuah sistem kelebihan beban tegangan rendah dapat menyebabkan pengoperasian yang tidak diinginkan dari impedansi.

2.4.3 Kestabilan Tegangan (Voltage Stability)

Kestabilan tegangan adalah kondisi dari sistem tenaga listrik guna membuat kestabilan tegangan dalam semua bus pada sistem sesudah terjadi gangguan yang berbeda dari kondisi operasi normal. Bentuk kestabilan ini sangat ditentukan oleh karakteristik beban, kontinuitas kendali, dan karakteristik kendali diskrit yang diberikan dalam jeda waktu instan. Hal ini sangat berguna untuk menentukan respon tegangan sistem atas perubahan minor pada sistem dalam waktu yang singkat. Hal tersebut akan sangat bergantung pada kemampuan sistem tenaga untuk membuat kebutuhan beban terjaga dan sistem tenaga tetap bisa tersedia. Diperlukan asumsi yang tepat, agar persamaan sistem dapat dibuat linier guna melakukan analisis sehingga dimungkinkan kalkulasi informasi yang berguna dalam menentukan faktor yang mempengaruhi kestabilan dan keseimbangan sistem. Cara untuk membuat persamaan

menjadi linier ini tidak mampu menjelaskan efek yang tidak linier, seperti *tap-changer control* (*deadbands*, *discrete tapsteps*, dan *time delays*).

1. Kestabilan tegangan jangka pendek

Melibatkan dinamika komponen beban bertindak cepat seperti motor induksi, beban dikontrol secara elektronik dan konverter HVDC. Masa studi interest berada di urutan beberapa detik dan analisis membutuhkan solusi yang tepat untuk persamaan diferensial sistem, hal ini mirip dengan analisis kestabilan sudut rotor. Pemodelan dinamis beban adalah sangat penting. Berbeda dengan kestabilan sudut, hubungan singkat dekat beban adalah penting. Dianjurkan bahwa istilah kestabilan tegangan transien tidak digunakan.

2. Kestabilan tegangan jangka panjang

Melibatkan peralatan bertindak lambat seperti transformer *tap-changer*, termostatik pengendali beban dan pembatas arus generator. Pada periode penelitian ini *interest* dapat diperpanjang untuk beberapa menit atau lebih dan simulasi jangka panjang yang diperlukan untuk analisis kinerja sistem dinamis (Kundur, 1994). Kestabilan biasanya ditentukan oleh pemadaman yang dihasilkan peralatan daripada keparahan gangguan awal. Ketidakstabilan ini disebabkan hilangnya keseimbangan jangka panjang (misalnya ketika beban mencoba untuk mengembalikan daya mereka di luar kemampuan jaringan transmisi dan pembangkit terhubung), pasca-gangguan titik operasi *steady-state* menjadi gangguan (misalnya ketika tindakan perbaikan yang diterapkan terlambat). Gangguan juga bisa menjadi beban penumpukan berkelanjutan (misalnya peningkatan beban pagi). Dalam banyak kasus, analisis statis (Kundur, 1994) dapat digunakan untuk memperkirakan margin kestabilan, mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kestabilan dan latar belakang berbagai kondisi sistem dan sejumlah besar skenario.

2.5 Persamaan Osilasi

Pada generator yang mengalami gangguan (baik besar maupun kecil) ataupun disturbansi kondisi sewaktu pengoperasian yang akan mengakibatkan pasokan dayanya berosilasi dan memiliki beberapa peluang: menuju kondisi stabil setelah hilangnya gangguan atau tetap berosilasi sehingga perlu dipisahkan dari sistem. Pada waktu generator sinkron memikul torsi mekanis sebesar T_m maka akan timbul torsi listrik sebesar T_e dan

didapatkan Persamaan (2-31) dengan mengabaikan rugi-rugi energi yang terjadi (Saadat, 1999).

$$T_m = T_e \dots\dots\dots (2-31)$$

Jika T_a merupakan selisih antara torsi mekanis dengan torsi elektrik pada mesin maka T_a merupakan torsi percepatan atau perlambatan dari generator sesuai dengan Persamaan (2-32).

$$T_a = T_m - T_e \dots\dots\dots (2-2)$$

Jika generator mempunyai momen kelembaman sewaktu bereaksi terhadap perubahan kondisi sebesar J , maka Persamaan (2-33) merupakan perumusan torsi percepatan yang mengabaikan gaya gesekan serta redaman.

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \dots\dots\dots (2-33)$$

Di mana θ_m adalah besar sudut dari perputaran rotor generator. Jika ω_{sm} adalah kecepatan sudut yang konstan, Persamaan (2-34) merupakan cara untuk menentukan besar sudut perputaran tersebut.

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \dots\dots\dots (2-34)$$

Di mana δ_m adalah posisi sudu pada waktu sebelum terjadi gangguan pada $t = 0$, Persamaan (2-35) adalah kecepatan sudut dari rotor generator.

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{ms} + \frac{d\delta_m}{dt} \dots\dots\dots (2-35)$$

Dan percepatan putaran sudut rotor adalah seperti pada Persamaan (2-36).

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \dots\dots\dots (2-36)$$

Substitusikan Persamaan (2-36) dalam Persamaan (2-33), maka diperoleh Persamaan (2-37).

$$\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \dots\dots\dots (2-37)$$

Dan dengan mengalikan Persamaan (2-37) dengan ω_m mengakibatkan seperti pada Persamaan (2-38).

$$J\omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \dots\dots\dots (2-38)$$

Sebagaimana diketahui, bahwa daya merupakan hasil kali antara torsi dan kecepatan sudut, maka akan didapatkan persamaannya seperti pada Persamaan (2-39).

$$J\omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \dots\dots\dots (2-39)$$

Perkalian $J\omega_m$ disebut konstanta inersia, dan disimbolkan dengan M , maka Persamaan (2-40) merupakan kaitan dengan energi kinetik W_k .

$$W_k = \frac{1}{2} J\omega_m^2 = \frac{1}{2} M\omega_m^2 \dots\dots\dots (2-40)$$

Atau dapat juga dinyatakan pada Persamaan (2-41).

$$M = \frac{2W_k}{\omega_m} \dots\dots\dots (2-41)$$

Selanjutnya dinyatakan sebagai Persamaan (2-42).

$$M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \dots\dots\dots (2-42)$$

Maka persamaan ayunan dapat dinyatakan menjadi Persamaan (2-43).

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \dots\dots\dots (2-43)$$

Jika p merupakan jumlah kutup dari generator sinkron maka Persamaan (2-44) adalah menyatakan persamaan sudut.

$$\delta = \frac{P}{2} \delta_m \dots\dots\dots (2-44)$$

Juga bisa dinyatakan dengan Persamaan (2-45).

$$\omega = \frac{P}{2} \delta_m \dots\dots\dots (2-45)$$

Persamaan ayunan mesin akan menjadi seperti pada Persamaan (2-46).

$$\frac{2}{p} M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \dots\dots\dots (2-46)$$

Atau dapat ditulis menjadi seperti pada Persamaan (2-47).

$$\frac{2}{p} \frac{2w_k d^2 \delta}{\omega_{sm} dt^2} = \frac{P_m}{S_B} - \frac{P_e}{S_B} \dots\dots\dots (2-47)$$

Jika konstanta H konstan dan dengan penggunaan satuan per unit, maka akan didapat Persamaan (2-48).

$$\frac{2}{p} \frac{2H^2 \delta}{\omega_{sm} dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \dots\dots\dots (2-48)$$

Dengan $P_{m(pu)}$ dan $P_{e(pu)}$ masing-masing adalah gaya dalam satuan per unit serta daya listrik. Persamaan (2-49) merupakan hubungan kecepatan sudut listrik dengan kecepatan sudut mekanis.

$$\omega_{sm} = (2/p)\omega_s \dots\dots\dots (2-49)$$

Dalam kaitan dengan kecepatan sudut elektrik adalah seperti pada Persamaan (2-50).

$$\frac{2H^2 \delta}{\omega_s dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \dots\dots\dots (2-50)$$

Jika kecepatan dinyatakan dalam frekuensi, maka didapat Persamaan (2-51).

$$\frac{2H^2 \delta}{\pi f_0 dt^2} = P_m - P_e \dots\dots\dots (2-51)$$

Di mana δ adalah radian pada listrik, maka Persamaan (2-52) merupakan persamaan osilasi.

$$\frac{H}{180 f_0} \frac{2\delta}{dt} = P_m - P_e \dots\dots\dots (2-52)$$

2.6 Karakteristik Unjuk Kerja Jaringan

Standar karakteristik unjuk kerja jaringan di Negara Timor Leste masih mengadopsi standar yang digunakan oleh negara Indonesia. Maka standar yang digunakan (pada penelitian ini) untuk mengetahui keadaan jaringan pada saat bekerja melayani beban menggunakan standar PERMEN-ESDM No. 3 Tahun 2007 tentang “Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Jawa-Madura-Bali”.

Standar digunakan agar kualitas daya yang diterima oleh pemakai jaringan dapat terpenuhi terutama pada saat jaringan berada dalam kondisi dinamik. Berapa parameter standar yang digunakan meliputi:

1. Frekuensi nominal sebesar 50 Hz digunakan, dengan batas aman bawah 49,5 Hz dan batas aman atas 50,5 Hz. Jika terjadi kondisi darurat (*emergency*) dan terjadi gangguan frekuensi maka frekuensi sistem dibatasi dengan batas bawah 47,5 Hz dan batas atas 52,0 Hz sebelum unit generator diijinkan untuk dikeluarkan dari operasi.
2. Harus ada pembatasan tegangan yang bisa bertahan pada sistem, di mana batasan yang diijinkan tersebut ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1

Nilai Tegangan (%) yang Diijinkan untuk Berbagai Level Tegangan

Nilai Tegangan	Batasan
500.000 V	+5% hingga -5%
150.000 V	+5% hingga -10%
70.000 V	+5% hingga -5%
20.000 V	+5% hingga -10%

3. Gangguan harmonisa maksimal dalam setiap bus pada situasi operasional yang normal ataupun dalam situasi yang lain baik keluarnya direncanakan ataupun tidak, hanya diijinkan bernilai seperti pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2

Nilai Distorsi Harmonisa yang Diijinkan untuk Berbagai Level Tegangan Sistem

Nilai Tegangan	Jumlah Distorsi
500.000 V	N/A
150.000 V	3 persen
70.000 V	3 persen
20.000 V	3 persen

4. Elemen berurutan negatif maksimal tegangan dalam fasa pada jaringan dibatasi sampai 1% dalam situasi operasional yang normal jika direncanakan keluarnya, kemudian dibatasi 2% ketika terjadi impuls pada tegangan sekejap.
5. Perubahan tegangan dalam satu titik penyambungan dan fluktuasi beban tidak boleh lebih dari pembatasan, antara lain:

Sebesar 2% pada prosentase tegangan dari setiap pengubahan *step* yang bisa saja berlaku secara berulang. Semua kebutuhan eksekusi tegangan yang cukup besar di luar pengubahan *step* bisa diijinkan sampai 3% asal jangan sampai mengakibatkan resiko pada jaringan transmisi maupun instalasi pada pemakai jaringan. Flicker tegangan sebesar sampai 5% sewaktu mengoperasikan motor listrik yang mana tidak terlalu sering masih bisa masuk dalam batas toleransi.

Flicker singkat dengan maksimal 1,0 unit dan jangka panjang maksimal 0,80 unit bila diukur menggunakan *flicker meter* harus disesuaikan pada spesifikasi IEC-868.

6. Prosentase faktor daya ($\cos \phi$) pada setiap poin sambungan dari instalasi pemakai jaringan menuju jaringan tidak boleh melebihi angka 0,89 *lagging*.
7. Waktu untuk memutus gangguan pada gangguan yang berada di sisi pemakai jaringan yang mana berhubungan langsung pada jaringan transmisi terhitung dari waktu gangguan terjadi sampai matinya *electrical arc* dari PMT wajib lebih kecil atau sama dengan sesuai dengan Tabel 2.3.

Tabel 2.3

Waktu Pemutusan Gangguan untuk Berbagai Level Tegangan Sistem

Nilai Tegangan	Waktu Pemutusan
500.000 V	90 ms
150.000 V	120 ms
70.000 V	150 ms

8. Jika terjadi kesalahan peralatan proteksi utama memakai jaringan, maka pemroteksi tambahan pada gangguan pada poin sambung tegangan tinggi pada yang menggunakan jaringan yang dimiliki pengguna jaringan wajib di-setting pada sela putus gangguan lebih kecil dari 400 ms. Pemroteksi tambahan pada pengguna jaringan harus pula memiliki kemampuan untuk mempertahankan diri tanpa adanya trip melawan arus beban yang ditimbulkan pada waktu pemutusan gangguan pada jaringan transmisi yang dilakukan oleh CB maupun pemroteksi tambahan. Hal ini akan membuat terjadinya peluang tidak adilnya pembagian periode dari pemroteksi tambahan yang dimiliki pengguna jaringan dengan pemroteksi tambahan yang berada di sisi jaringan transmisi. Pemroteksi gagal PMT wajib di-install di setiap poin sambungan PMT 500.000 V dan 150.000 V. Jika terjadi gagal putus arus gangguan PMT yang bersangkutan, pemroteksi gagal PMT tersebut harus memutus

semua PMT yang berhubungan pada PMT gagal dengan sela waktu lebih kecil dari 250 ms tetapi wajib lebih besar dari 200 ms.



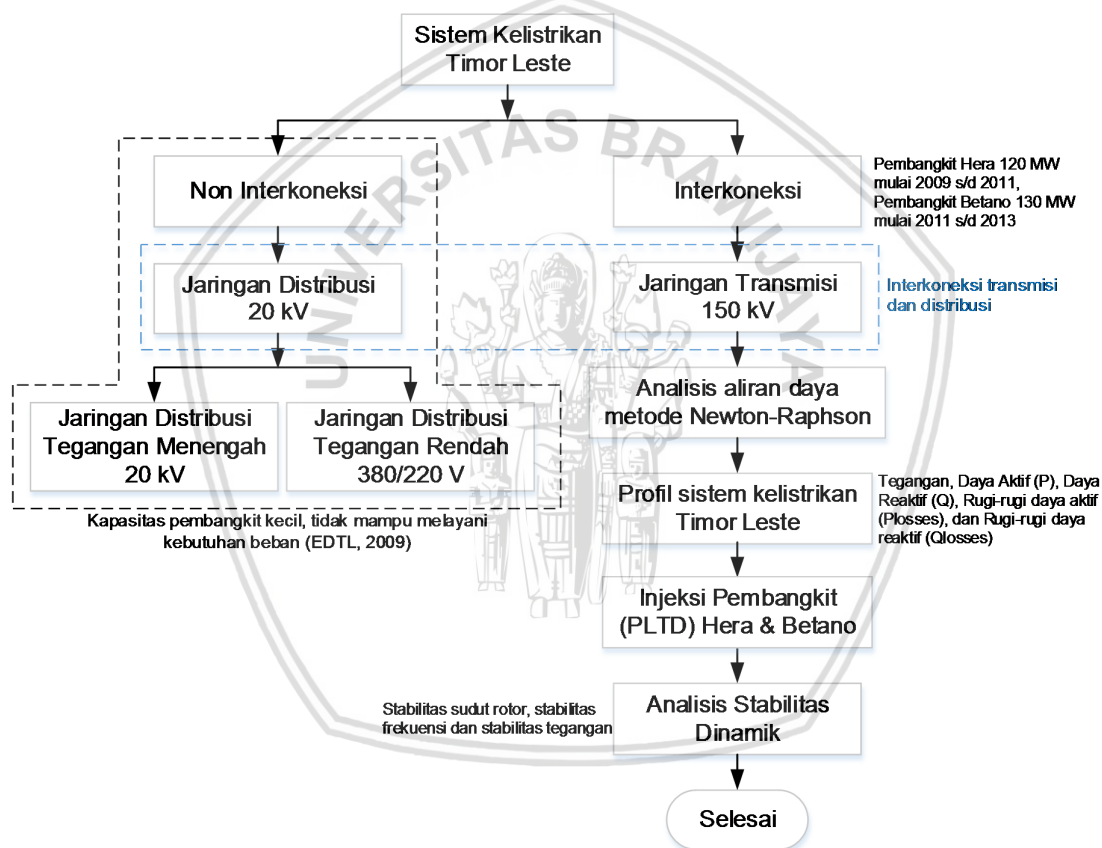


BAB III

KERANGKA KONSEP PENELITIAN

3.1 Kerangka Pikir

Berdasarkan tinjauan pustaka dan landasan teori, maka diagram alir kerangka berfikir dapat dilihat pada Gambar 3.1. Pada diagram alir kerangka konsep penelitian tersebut dijelaskan tentang konsep penelitian, yang terdiri dari analisis aliran daya (*steady state*) dan analisis kestabilan dinamik pada sistem kelistrikan Timor Leste 150 kV.



Gambar 3.1 Diagram alir kerangka konsep penelitian.

Sistem kelistrikan Timor Leste sejak tahun 2002 sampai dengan tahun 2011 masih mengandalkan pembangkit-pembangkit skala kecil yang letaknya tersebar, mencukupi kebutuhan listrik secara mandiri (tanpa interkoneksi dengan pembangkit-pembangkit lain). Setiap tahun konsumsi listrik di Timor leste meningkat, akibat peningkatan konsumsi listrik tersebut pembangkit-pembangkit listrik yang bekerja secara mandiri tanpa interkoneksi dengan pembangkit-pembangkit lain tidak mampu untuk mencukupi kebutuhan listrik

sehingga di beberapa Distrik sering terjadi pemadaman listrik (EDTL, 2009). Pada tahun 2009 sampai dengan tahun 2013 dibangun dua pembangkit terpusat (PLTD) yakni pembangkit Hera kapasitas 120 MW 7 unit Generator masing-masing berkapasitas 17,5 MW yang berada di Distrik Dili dan pembangkit Betano kapasitas 130 MW 8 unit Generator masing-masing 17,5 MW yang berada di Distrik Same. Serta dibangun 9 Gardu Induk (GI) yang tersebar di wilayah Timor Leste meliputi GI Dili, GI Liquica, GI Maliana, GI Suai, GI Betano, GI Manatuto, GI Baucau, GI Lospalos, dan GI Viqueque yang saling terinterkoneksi dengan saluran transmisi 150 kV.

Analisis aliran daya dilakukan untuk mengetahui data sistem kelistrikan Timor Leste berupa nilai parameter tegangan, daya aktif (P), daya reaktif (Q), rugi-rugi daya aktif (P_{loss}), dan rugi-rugi daya reaktif (Q_{loss}) pada masing-masing GI sebelum dan sesudah injeksi pembangkit baru. Analisis aliran daya menggunakan metode *Newton Raphson*. Metode ini menggunakan kalkulasi yang cukup akurat untuk sistem tenaga besar karena mempunyai waktu perhitungan konvergensi yang lebih cepat dan jumlah iterasi yang jauh lebih sedikit jika dibandingkan dengan metode lain (Cekdin, 2010).

Selain melakukan analisis aliran daya, pada penelitian ini juga dilakukan analisis kestabilan untuk mengetahui kemampuan sistem, apakah akan kembali stabil setelah terjadi gangguan (hubung singkat/*short circuit*) pada sistem. Analisis kestabilan yang dilakukan meliputi analisis kestabilan frekuensi, kestabilan sudut rotor, dan kestabilan tegangan sebelum dan sesudah diinjeksikan PLTD Hera dan PLTD Betano.

3.2 Variabel Penelitian

Beberapa besaran yang dipakai pada penelitian “Analisis Injeksi Pembangkit Baru Hera dan Betano pada Sistem Interkoneksi di EDTL Timor Leste” adalah:

1. Variabel *input*

- a. Diagram segaris sistem kelistrikan Timor Leste (150 kV).
- b. Data Generator pada pembangkit Hera dan Betano:
 - i. Rating daya (MW), tegangan (kV) dan faktor daya (%).
 - ii. Eksiter dan Governor.
- c. Data transformator setiap Gardu Induk:
 - i. Kapasitas trafo (MVA).

- ii. Rasio tegangan trafo (kV).
- iii. Impedansi trafo.
- d. Data penghantar:
 - i. Panjang penghantar (km).
 - ii. Luas penampang penghantar (mm^2).
 - iii. Jenis penghantar.
 - iv. Impedansi penghantar.
- e. Data pembebanan setiap Gardu Induk (MVA).

2. Variabel *output*

- a. Analisis aliran daya:
 - i. Nilai tegangan sistem (kV).
 - ii. Daya aktif (P) dan daya reaktif (Q).
 - iii. Rugi-rugi daya aktif (P_{loss}) dan rugi-rugi daya reaktif (Q_{loss}).
- b. Analisis kestabilan:
 - i. Kestabilan sudut rotor.
 - ii. Kestabilan frekuensi.
 - iii. Kestabilan tegangan.

3.3 Hipotesis

Injeksi dua pembangkit baru yaitu PLTD Hera dan PLTD Betano pada sistem interkoneksi dapat meningkatkan performa sistem kelistrikan di Timor Leste.



BAB IV

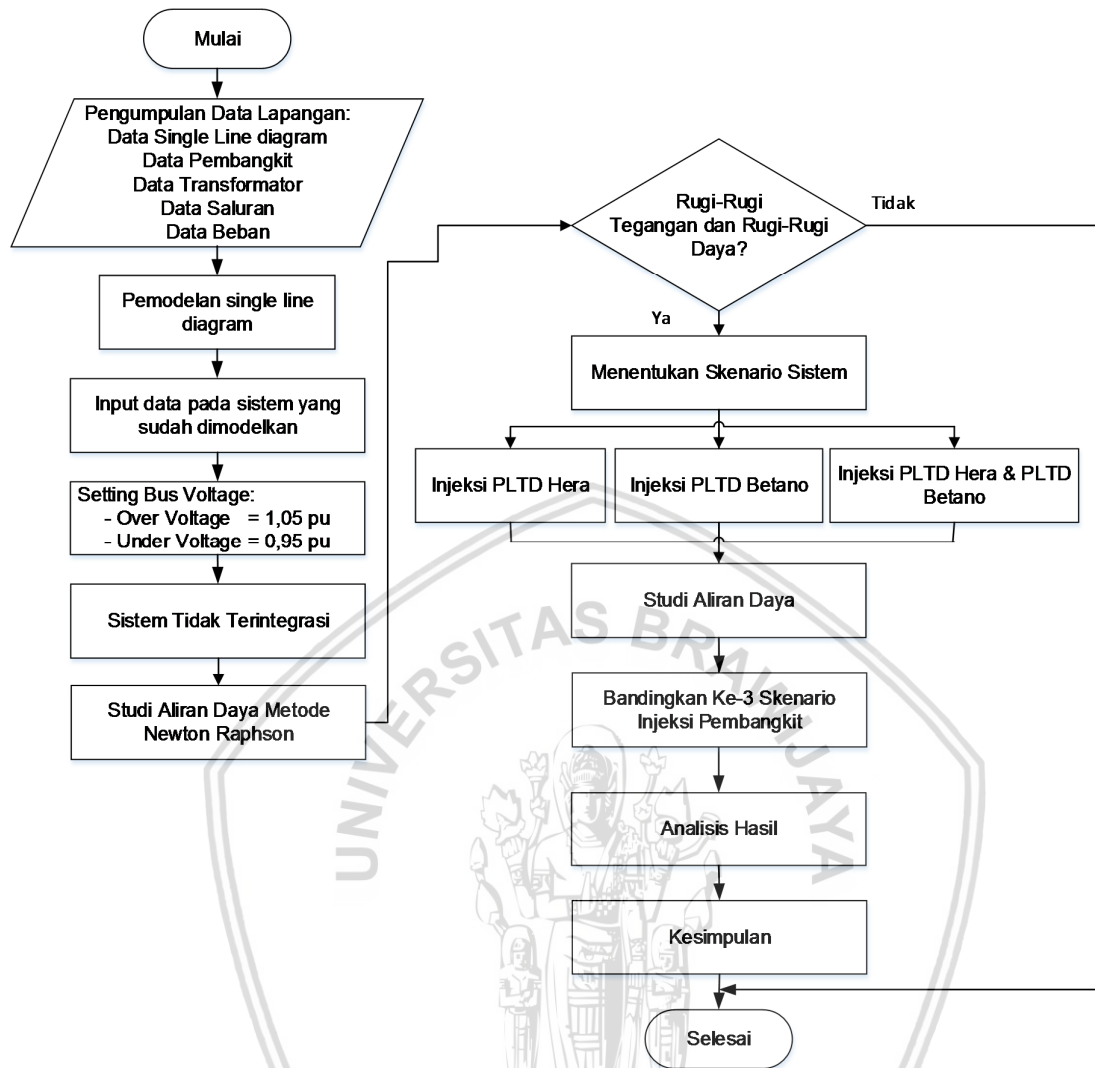
METODE PENELITIAN

4.1 Diagram Alir Analisis Aliran Daya

Tahapan yang dilakukan pada penelitian ini dimulai dari pengumpulan data lapangan berupa data diagram segaris sistem kelistrikan Timor Leste 150 kV; data pembangkit: kapasitas generator (MW), tegangan generator (kV), faktor daya generator (%), sistem eksitasi, dan governor; data transformator: kapasitas trafo (MVA), rasio tegangan trafo (kV), dan impedansi trafo; data penghantar: panjang penghantar (km), luas penampang penghantar (mm^2), impedansi penghantar, dan jenis penghantar; data pembebanan setiap gardu induk: daya aktif (MW), daya reaktif (MVAR), Arus (Amper), faktor daya dan tegangan (kV). Selanjutnya dilakukan input data pada sistem kelistrikan Timor Leste yang sudah dimodelkan menggunakan *software ETAP Power Station* versi 12.6.0.

Setting variasi tegangan pada sistem yang dimodelkan berdasarkan permen ESDM no. 3 tahun 2007 untuk tegangan sistem 150 kV sebesar +5% dan -10%. Melakukan analisis aliran daya yang menggunakan metode *Newton Raphson* sebelum sistem terintegrasi untuk mengetahui karakteristik kelistrikan Timor Leste, meliputi nilai tegangan (kV), rugi-rugi daya aktif (P_{loss}) dan rugi-rugi daya reaktif (Q_{loss}). Apabila terjadi rugi-rugi tegangan dan rugi-rugi daya ($P_{loss} \& Q_{loss}$) maka dilakukan injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano, skenario yang dilakukan meliputi: sistem terintegrasi dengan PLTD Hera, sistem terintegrasi dengan PLTD Betano dan sistem terintegrasi dengan PLTD Hera dan PLTD Betano.

Lakukan kembali studi aliran daya, dan bandingkan hasil untuk tiga skenario injeksi pembangkit tersebut. Apabila sistem tidak mengalami masalah, profil tegangan dan *losses* ($P_{loss} \& Q_{loss}$) masih dalam batas-batas yang diizinkan maka penelitian selesai (tidak dilanjutkan) dan mencari lokasi penelitian di tempat yang lain. Diagram alir analisis aliran daya dapat dilihat pada Gambar 4.1.



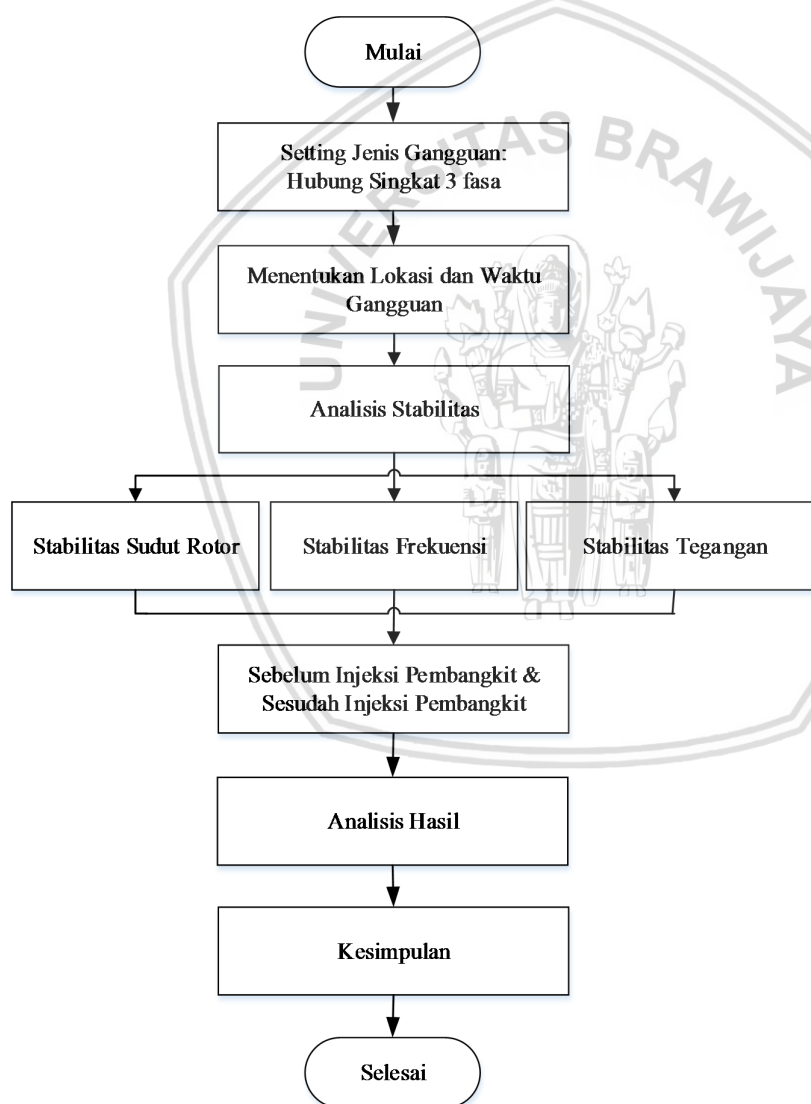
Gambar 4.1 Diagram alir analisis aliran daya.

4.2 Diagram Alir Analisis Kestabilan Dinamis

Tahapan analisis kestabilan dinamik dimulai dari melakukan input data pada pemodelan sistem kelistrikan Timor Leste yang sudah dilakukan. Selanjutnya dilakukan *setting* gangguan berupa gangguan hubung singkat tiga fasa, lokasi gangguan ditentukan di bus terdekat dengan pembangkit yaitu Dili substation (bus-9), Liquica substation (bus-12), Manatuto substation (bus-40) dan Baucau substation (bus-37). Gangguan hubung singkat 3 fasa diskenarioikan terjadi pada $t = 1$ detik. Melakukan analisis kestabilan dinamik, meliputi analisis kestabilan sudut rotor, kestabilan frekuensi, dan kestabilan tegangan sebelum dan sesudah injeksi pembangkit (PLTD Betano). Apabila pada saat terjadi gangguan $t = 1$ detik kestabilan sudut rotor, kestabilan frekuensi dan kestabilan tegangan dapat kembali pada

kondisi operasi sinkron dan masih dalam batas-batas yang diizinkan sesuai dengan permen ESDM no. 3 tahun 2007 maka dilakukan analisis hasil dan dibandingkan waktu pemulihan sistem setelah terjadi gangguan hubung singkat sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano.

Analisis kestabilan dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem kelistrikan Timor Leste untuk tetap bisa bertahan pada operasional sinkron setelah mengalami disturbansi (Bisen dan Shrivastava, 2013). Disturbansi yang dimaksudkan bisa merupakan pembebanan secara spontan, hilangnya generator, hilangnya beban besar, maupun disturbansi hubungan singkat (Chaudhary dan Jaswal, 2014). Diagram alir analisis kestabilan dinamik dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Diagram alir analisis kestabilan dinamis.

4.3 Bahan dan Alat yang Digunakan

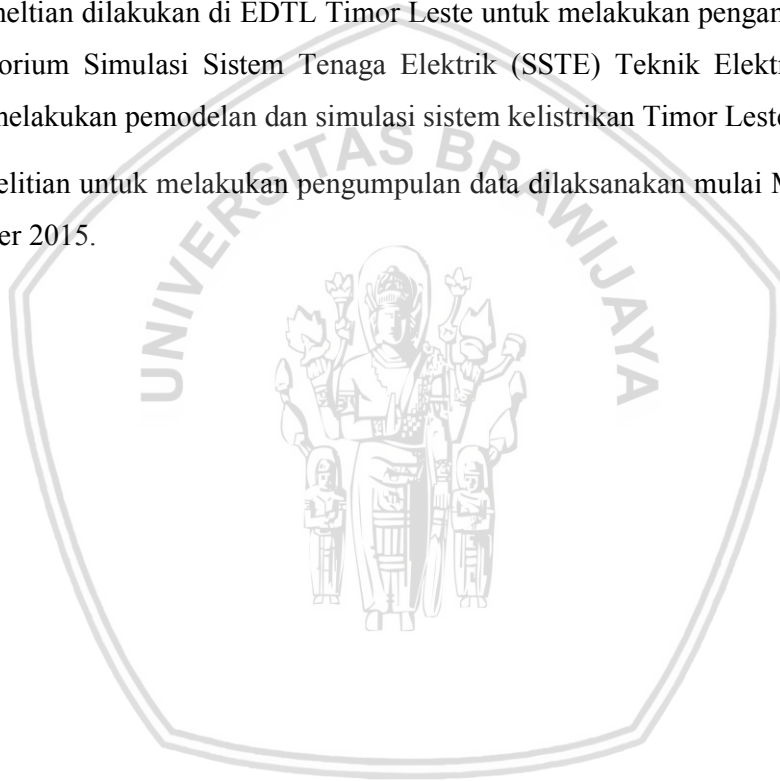
Beberapa perangkat maupun peralatan yang digunakan untuk menunjang penelitian ini adalah:

1. Laptop.
2. *Software ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) Power Station.*
3. Data sistem kelistrikan Timor Leste 150 kV.

4.4 Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat penelitian dilakukan di EDTL Timor Leste untuk melakukan pengambilan data dan di Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Elektrik (SSTE) Teknik Elektro S1 ITN Malang untuk melakukan pemodelan dan simulasi sistem kelistrikan Timor Leste.

Waktu penelitian untuk melakukan pengumpulan data dilaksanakan mulai Maret 2014 hingga Desember 2015.



BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Sistem Distribusi 20 kV Distrik Dili

Sistem kelistrikan Timor Leste tahun 2002-2011 di setiap distrik disuplai dari pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) dengan jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV yang tidak saling terhubung (interkoneksi) antara distrik yang ada, hal ini berdampak pada keandalan dan kontinuitas penyaluran tenaga listrik (sering terjadi pemadaman listrik). Untuk keperluan analisis dan pembandingan sebelum dan sesudah injeksi pembangkit baru, maka pada penelitian ini digunakan data-data lama sistem 20 kV (sebelum interkoneksi). Data-data tersebut diambil dari salah satu distrik yang berada di wilayah Timor Leste yaitu distrik Dili yang memiliki data yang cukup lengkap dan terekam dengan baik. Sistem kelistrikan di distrik Dili terdiri dari 6 *feeder* yang dapat dilihat pada Lampiran 1 *single line* diagram distrik Dili.

5.1.1 Data Pembangkit di Distrik Dili

Jumlah pembangkit yang berada di distrik Dili sebanyak 27 unit dengan total kapasitas daya terpasang sebesar 36.532 kW, namun hanya bisa membangkitkan daya sebesar 24.890 kW, dikarenakan ada beberapa unit mesin yang mengalami gangguan. Berikut data pembangkit di distrik Dili ditunjukkan pada Lampiran 2.

5.1.2 Data Transformator

Jumlah keseluruhan trafo tiang yang berada di Distrik Dili sebanyak 227 unit dengan kapasitas trafo terkecil sebesar 25 kVA dan kapasitas trafo terbesar bernilai 1.000 kVA yang berada di *feeder* 1 dan *feeder* 3. Lampiran 3 menunjukkan data kapasitas trafo di tiap-tiap *feeder*.

5.1.3 Data Saluran Distrik Dili

Distrik Dili memiliki 6 *feeder* dengan total panjang saluran udara tegangan menengah sejauh 204,931 kms (kilometer sirkuit), jenis penghantar yang digunakan yaitu *AAAC* (*All-Aluminium-Alloy Conductor*). Tabel 5.1 memeperlihatkan panjang dan luas penampang yang digunakan pada masing-masing *feeder*.

Tabel 5.1
Data Panjang Saluran dan Luas Penampang setiap *Feeder*

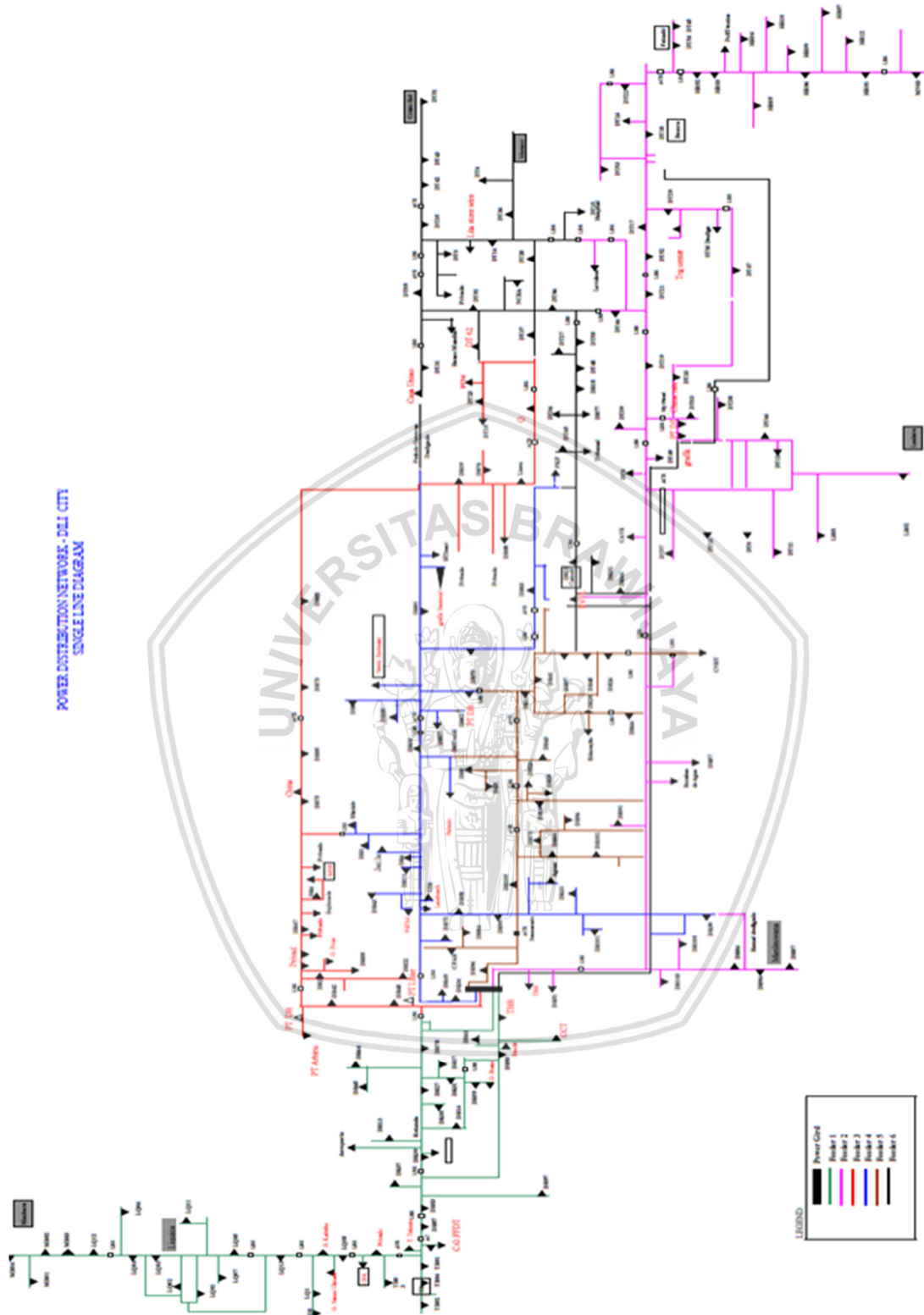
<i>Feeder</i>	Panjang Saluran (kms)	Luas Penampang (mm ²)
I (Liquisa)	75,020	70, 150 dan 240
II (Metinaro)	67,430	70, 150 dan 240
III (Pasir Putih)	13,806	70, 150 dan 240
IV (Fatuhada)	16,060	70, 150 dan 240
V (Audian)	15,125	70, 150 dan 240
VI (Comoro)	17,490	70, 150 dan 240

Sumber : Data EDTL, 2012.

5.1.4 Data Beban Distrik Dili

Total beban pada 6 *feeder* di distrik Dili sebesar 22.314 kW untuk beban malam dan 18.813 kW untuk beban siang. Sedangkan beban terbesar berada di *feeder* VI (Comoro) sebesar 147 kW dan *feeder* II (Metinaro) sebesar 132 kW. Data beban pada tiap-tiap *feeder* dapat dilihat pada Lampiran 4.

Dari *single line* diagram dan data-data yang sudah didapatkan, maka dilakukan pemodelan sistem 20 kV distrik Dili 6 *feeder* seperti yang terlihat pada Lampiran 5.



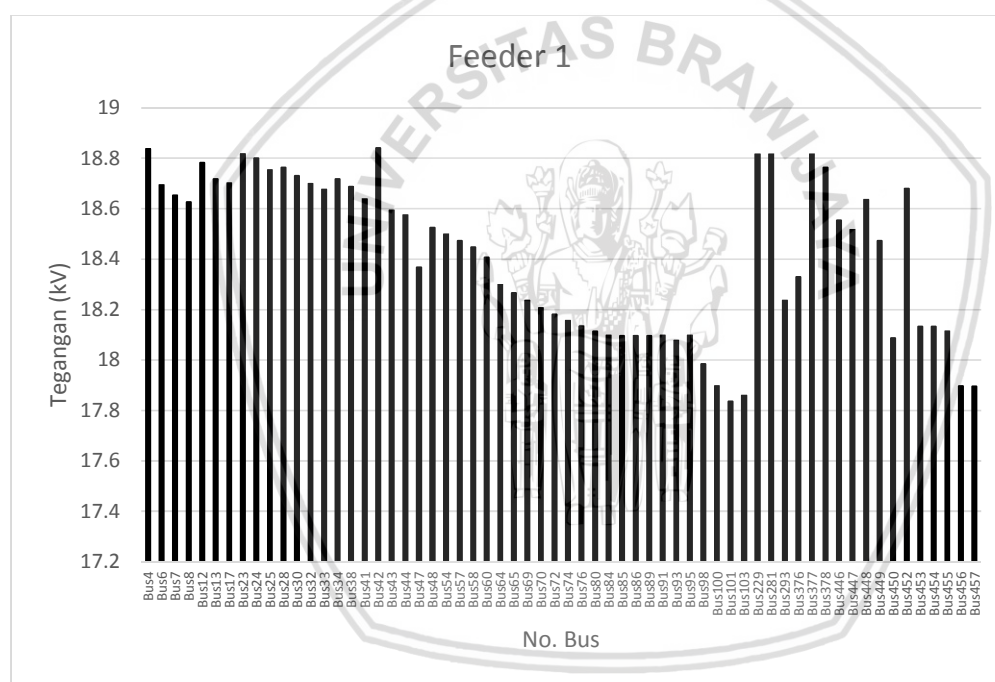
Gambar 5.1 Single-line diagram distrik Dili.

5.2 Hasil Analisis Aliran Daya Distrik Dili Sistem 20 kV

5.2.1 Sebelum Injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano

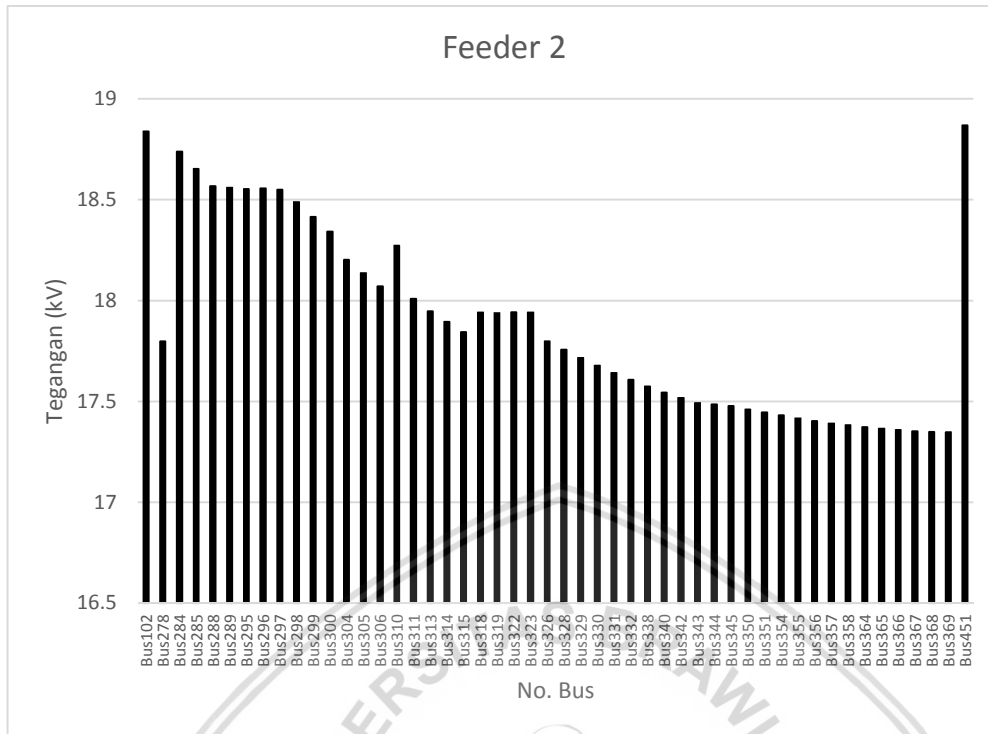
Hasil analisis aliran daya sebelum injeksi pembangkit menunjukkan bahwa dari enam *feeder* yang berada di distrik Dili, tiga *feeder* yaitu *feeder 1*, *feeder 2*, *feeder 6* di beberapa bus mengalami penurunan tegangan di luar standar yang ditetapkan yaitu +5% dan -10%. Salah satu disebabkan karena *feeder 1*, *feeder 2* dan *feeder 6* merupakan *feeder* terpanjang, beban yang dilayani cukup besar bila dibandingkan dengan tiga *feeder* lainnya (*feeder 3*, *feeder 4* dan *feeder 5*).

Gambar 5.2 memperlihatkan grafik tegangan bus di *feeder 1* sebelum injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano.



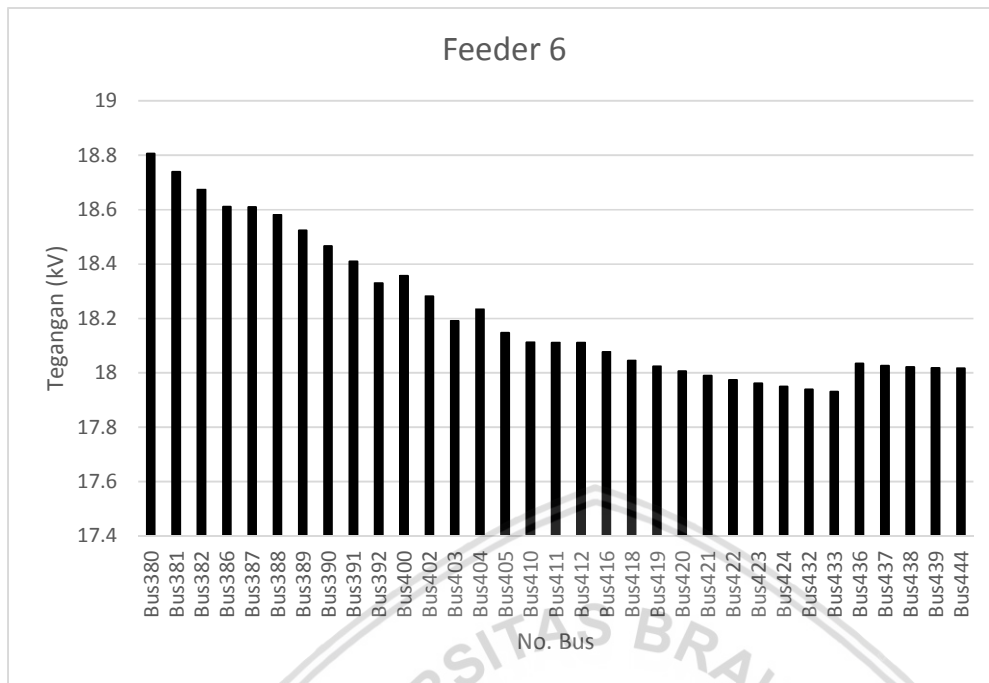
Gambar 5.2 Grafik tegangan sistem pada *feeder 1* sebelum injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano.

Gambar 5.3 memperlihatkan grafik tegangan bus di *feeder 2* sebelum injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano.



Gambar 5.3 Grafik tegangan sistem pada *feeder 2* sebelum injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano.

Sedangkan Gambar 5.4 memperlihatkan grafik tegangan bus di *feeder 6* sebelum injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano.



Gambar 5.4 Grafik tegangan sistem pada *feeder* 6 sebelum injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano.

Gambar 5.2 menunjukkan bahwa pada *feeder* 1 terdapat 6 bus yang mengalami penurunan tegangan, yakni di bus 98, bus 100, bus 101, bus 103, bus 456 dan bus 457. Bus yang paling besar mengalami penurunan tegangan berada di bus 101 sebesar $V = 17,836$ kV atau -11%. Gambar 5.3 menunjukkan bahwa pada *feeder* 2 ada 33 bus yang mengalami penurunan tegangan, yakni di bus 278, bus 313 hingga bus 315, bus 318, bus 319, bus 322, bus 323, bus 326, bus 328 hingga bus 332, bus 338, bus 340, bus 342 hingga bus 345, bus 350, bus 351, bus 354 hingga bus 358, bus 364 hingga bus 369. Bus yang paling besar mengalami penurunan tegangan berada di bus 369 yaitu sebesar $V = 17,348$ kV atau -13%. Gambar 5.4 menunjukkan bahwa pada *feeder* 6 ada 6 bus yang mengalami penurunan tegangan, yakni di bus 421 hingga bus 424, bus 432 dan bus 433. Bus yang paling besar mengalami penurunan tegangan berada di bus 433 sebesar $V = 17,931$ kV atau -10%. Kondisi tegangan sistem di 6 *feeder* di distrik Dili hasil analisis aliran daya sebelum injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano disajikan pada Lampiran 6.

5.2.2 Setelah Injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano

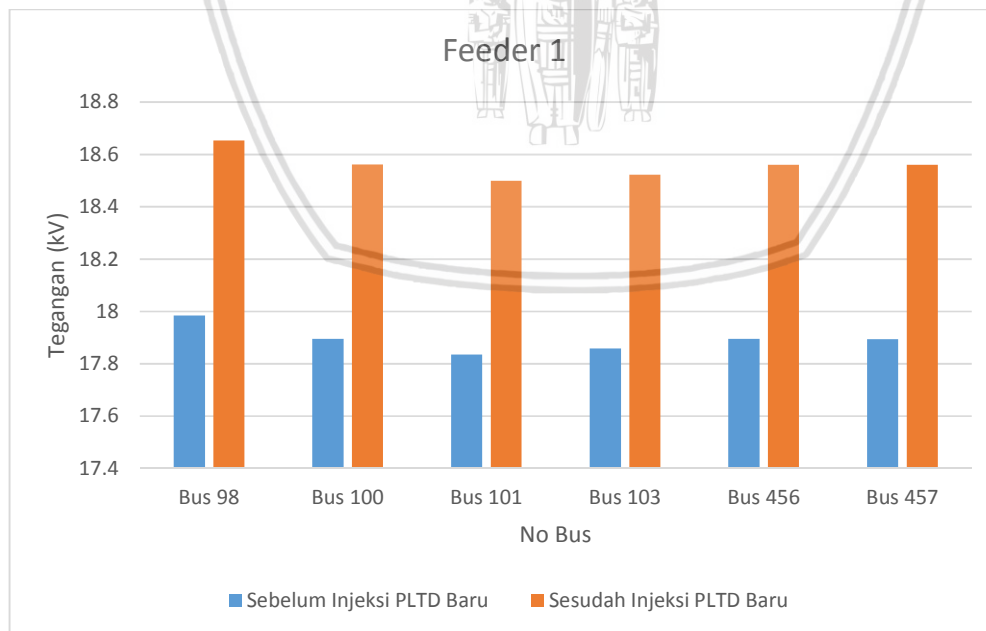
Hasil analisis aliran daya sesudah injeksi pembangkit baru (PLTD Hera dan PLTD Betano) pada sistem 20 kV di Distrik Dili seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.5, Gambar 5.6, dan Gambar 5.7. Dari gambar tersebut terlihat bahwa, setelah dilakukan injeksi

pembangkit baru kapasitas daya total $P = 250$ MW nilai tegangan di masing-masing bus di *feeder 1*, *feeder 2* dan *feeder 6* mengalami peningkatan. *Feeder 1*, Bus 98 yang semula penurunan tegangan -10% naik menjadi -7%, bus 100 dari -11% naik menjadi -7%, bus 101 dari -11% naik menjadi -8%, bus 103 dari -11% naik menjadi -7%, bus 456 dari -11% naik menjadi -7% dan bus 457 dari -11% naik menjadi -7% seperti yang terlihat pada Tabel 5.2. Kondisi tegangan sistem di 6 *feeder* di distrik Dili hasil analisis aliran daya sesudah injeksi PLTD Hera & PLTD Betano disajikan pada Lampiran 7.

Tabel 5.2

Perbandingan Nilai Tegangan Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Baru pada Bus yang Mengalami Penurunan Tegangan di *Feeder 1* Hasil Simulasi

Feeder 1	Kondisi Tegangan Sistem			
	Sebelum Injeksi PLTD Baru		Sesudah Injeksi PLTD baru	
	kV	%	kV	%
Bus 98	17,985	-10,075	18,654	-6,73
Bus 100	17,896	-10,52	18,562	-7,19
Bus 101	17,836	-10,82	18,499	-7,505
Bus 103	17,859	-10,705	18,523	-7,385
Bus 456	17,896	-10,52	18,561	-7,195
Bus 457	17,895	-10,525	18,561	-7,195



Gambar 5.5 Grafik tegangan sistem di *feeder 1* sebelum dan sesudah injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano.

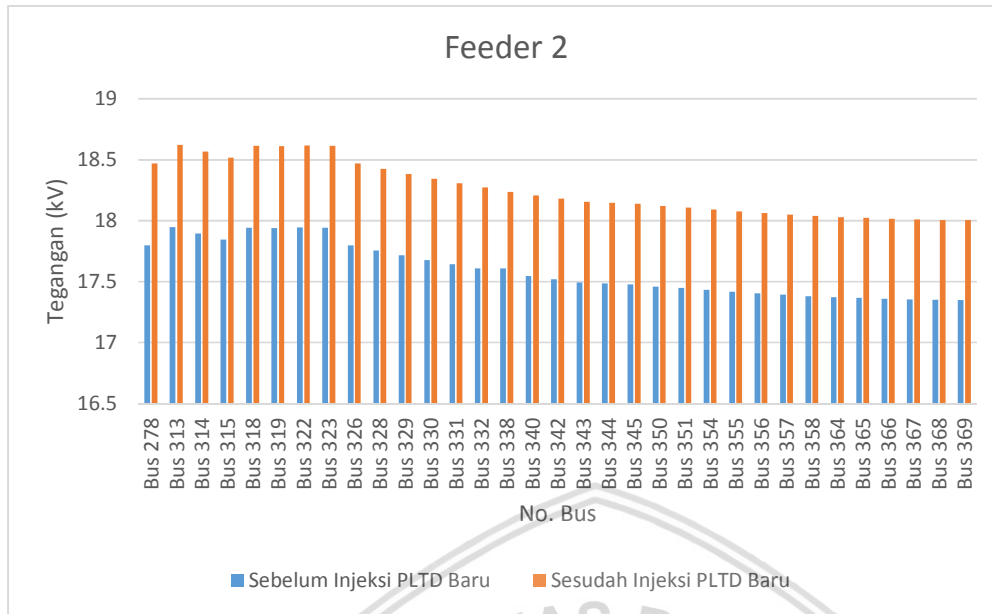
Feeder 2, Bus 278 yang semula penurunan tegangan -11% naik menjadi -8%, bus 313 dari -10% naik menjadi -7%, bus 314 dari -11% naik menjadi -7%, bus 315 dari -11% naik menjadi -7%, bus 318 dari -10% naik menjadi -7%, bus 319 dari -10% naik menjadi -7%, bus 322 dari -10% naik menjadi -7%, bus 323 dari -10% naik menjadi -7%, bus 326 dari -11% naik menjadi -8%, bus 328 dari -11% naik menjadi -8%, bus 329 dari -11% naik menjadi -8%, bus 330 dari -12% naik menjadi -8%, bus 331 dari -12% naik menjadi -8%, bus 332 dari -12% naik menjadi -9%, bus 338 dari -12% naik menjadi -9%, bus 340 dari -12% naik menjadi -9%, bus 342 dari -12% naik menjadi -9%, bus 343 dari -13% naik menjadi -9%, bus 344 dari -13% naik menjadi -9%, bus 345 dari -13% naik menjadi -9%, bus 350 dari -13% naik menjadi -9%, bus 351 dari -13% naik menjadi -%, bus 354 dari -13% naik menjadi -10%, bus 355 dari -13% naik menjadi -10%, bus 356 dari -13% naik menjadi -10%, bus 357 dari -13% naik menjadi -10%, bus 358 dari -13% naik menjadi -10%, bus 364 dari -13% naik menjadi -10%, bus 365 dari -13% naik menjadi -10%, bus 366 dari -13% naik menjadi -10%, bus 367 dari -13% naik menjadi -10%, bus 368 dari -13% naik menjadi -10%, bus 369 dari -13% naik menjadi -10%, seperti yang terlihat pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3

Perbandingan Nilai Tegangan Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Baru pada Bus yang Mengalami Penurunan Tegangan di *Feeder 2* Hasil Simulasi

<i>Feeder 2</i>	Kondisi Tegangan Sistem			
	Sebelum Injeksi PLTD Baru		Sesudah Injeksi PLTD Baru	
	kV	%	kV	%
Bus 278	17,798	-11	18,468	-8
Bus 313	17,947	-10	18,621	-7
Bus 314	17,895	-11	18,568	-7
Bus 315	17,845	-11	18,516	-7
Bus 318	17,942	-10	18,616	-7
Bus 319	17,939	-10	18,613	-7
Bus 322	17,943	-10	18,617	-7
Bus 323	17,941	-10	18,615	-7
Bus 326	17,799	-11	18,469	-8
Bus 328	17,756	-11	18,425	-8
Bus 329	17,716	-11	18,383	-8
Bus 330	17,677	-12	18,344	-8
Bus 331	17,642	-12	18,307	-8
Bus 332	17,608	-12	18,272	-9
Bus 338	17,608	-12	18,238	-9

<i>Feeder 2</i>	Kondisi Tegangan Sistem			
	Sebelum Injeksi PLTD Baru		Sesudah Injeksi PLTD Baru	
	kV	%	kV	%
Bus 340	17,545	-12	18,208	-9
Bus 342	17,518	-12	18,18	-9
Bus 343	17,493	-13	18,154	-9
Bus 344	17,485	-13	18,146	-9
Bus 345	17,478	-13	18,139	-9
Bus 350	17,46	-13	18,121	-9
Bus 351	17,447	-13	18,107	-9
Bus 354	17,432	-13	18,091	-10
Bus 355	17,417	-13	18,076	-10
Bus 356	17,403	-13	18,061	-10
Bus 357	17,392	-13	18,05	-10
Bus 358	17,382	-13	18,04	-10
Bus 364	17,374	-13	18,031	-10
Bus 365	17,366	-13	18,023	-10
Bus 366	17,359	-13	18,016	-10
Bus 367	17,353	-13	18,01	-10
Bus 368	17,35	-13	18,006	-10
Bus 369	17,348	-13	18,005	-10



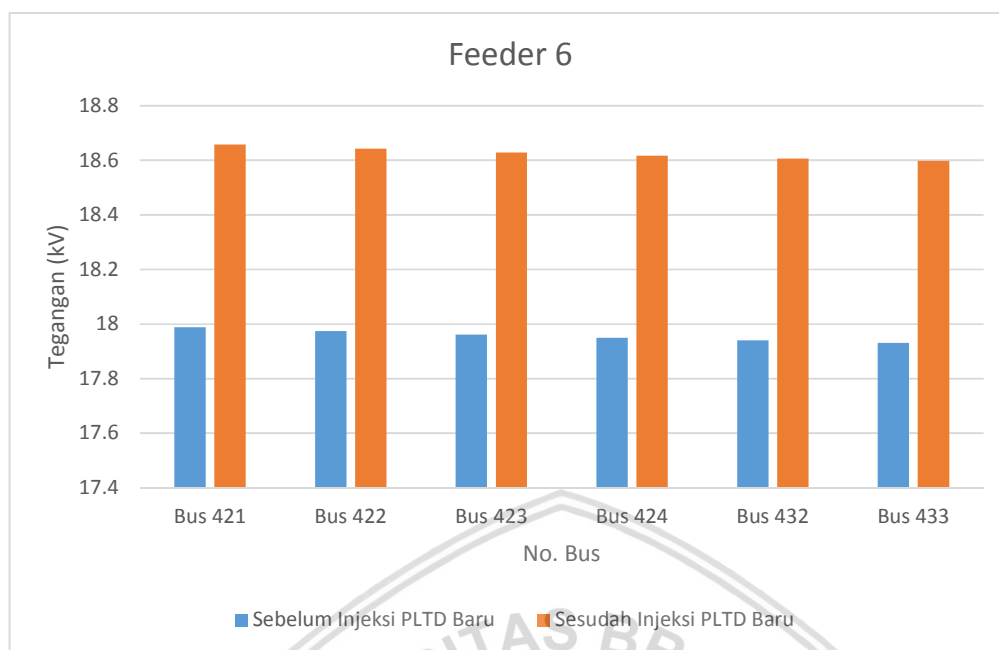
Gambar 5.6 Grafik tegangan sistem di *feeder 2* sebelum dan sesudah injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano.

Feeder 6, Bus 421 yang semula penurunan tegangan -10% naik menjadi -7%, bus 422 dari -10% naik menjadi -7%, bus 423 dari -10% naik menjadi -7%, bus 424 dari -10% naik menjadi -7%, bus 432 dari -10% naik menjadi -7% dan bus 433 dari -10% naik menjadi -7% seperti yang terlihat pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4

Perbandingan Nilai Tegangan Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Baru pada Bus yang Mengalami Penurunan Tegangan di *Feeder 6* Hasil Simulasi

<i>Feeder 6</i>	Kondisi Tegangan Sistem			
	Sebelum Injeksi PLTD Baru		Sesudah Injeksi PLTD baru	
	kV	%	kV	%
Bus 421	17,989	-10	18,658	-7
Bus 422	17,974	-10	18,643	-7
Bus 423	17,962	-10	18,629	-7
Bus 424	17,95	-10	18,617	-7
Bus 432	17,94	-10	18,607	-7
Bus 433	17,931	-10	18,598	-7



Gambar 5.7 Grafik tegangan sistem di *feeder* 6 sebelum dan sesudah injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano.

5.2.3 Rugi-Rugi Daya (Power Losses) Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano

Hasil analisis aliran daya sistem kelistrikan Timor Leste 20 kV sebelum dan sesudah injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano diperoleh perbandingan nilai total *losses* yang terjadi pada distrik Dili 20 kV, seperti yang akan ditunjukkan pada Tabel 5.5.

Tabel 5.5

Perbandingan *Total Losses* pada Distrik Dili 20 kV Hasil Simulasi

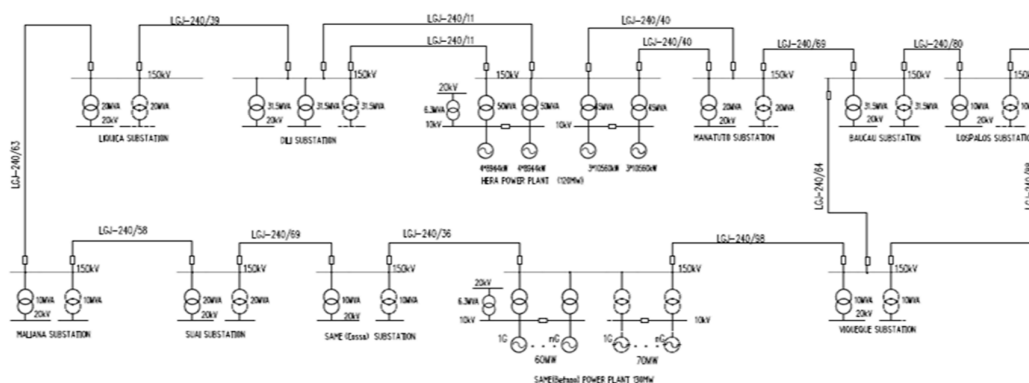
Hasil Aliran Daya dan <i>Losses</i>	Kondisi Pengujian Sistem	
	Sebelum Injeksi PLTD Hera & PLTD Betano	Sesudah Injeksi PLTD Hera & PLTD Betano
Total Pembangkitan		
Daya aktif (MW)	27,235	28,760
Daya reaktif (MVAR)	4,303	2,184
Total Pembebanan		
Daya aktif (MW)	25,381	27,247
Daya reaktif (MVAR)	2,079	2,196

Hasil Aliran Daya dan <i>Losses</i>	Kondisi Pengujian Sistem	
	Sebelum Injeksi PLTD Hera & PLTD Betano	Sesudah Injeksi PLTD Hera & PLTD Betano
Total <i>Losses</i>		
Daya aktif (MW)	1,854	1,513
Data reaktif (MVAR)	2,224	0,012
Prosentase <i>Losses</i>		
Daya aktif (%)	6,8 %	5,3 %
Daya reaktif (%)	52 %	0,55 %

Tabel 5.5 menunjukkan hasil perbandingan total *losses* untuk dua kondisi pengujian. Dari tabel tersebut terlihat bahwa rugi-rugi daya terbesar terjadi pada saat sistem masih belum terinterkoneksi dengan PLTD Hera dan PLTD Betano dengan nilai sebesar $P_{losses} = 1,856$ MW (6,8%) dan $Q_{losses} = 2,226$ MVAR (52%). Setelah dilakukan interkoneksi dengan PLTD Hera dan PLTD Betano rugi-rugi daya berkurang menjadi sebesar $P_{losses} = 1,510$ MW (5,3%) dan $Q_{losses} = 0,015$ MVAR (0,55%). Lampiran 8 menunjukkan data P_{losses} dan Q_{losses} hasil analisis aliran daya di setiap beban dan pembangkit.

5.3 Sistem Transmisi 150 kV Timor Leste

Sistem kelistrikan Timor Leste yang sekarang disuplai dari dua pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) terpusat, yaitu PLTD Hera dengan kapasitas daya $P = 120$ MW yang berlokasi di distrik Dili dan PLTD Betano dengan kapasitas daya $P = 130$ MW yang berlokasi di distrik Same. Kedua pembangkit tersebut saling terinterkoneksi melalui saluran transmisi 150 kV dan 9 gardu induk, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 5.8.



Gambar 5.8 Single-line diagram sistem kelistrikan Timor Leste 150 KV.

5.3.1 Data Generator

Jumlah generator yang digunakan pada dua pembangkit sebanyak 15 unit generator berkapasitas sama yaitu 17,5 MW. Dengan pembagian 7 unit generator berada di PLTD Hera total daya 120 MW dan 8 unit generator di PLTD Betano total daya 130 MW. Sehingga total daya yang tersedia di sistem kelistrikan Timor Leste sebesar 250 MW. Lampiran 9 menunjukkan data spesifikasi generator pada PLTD Hera dan PLTD Betano.

5.3.2 Data Trafo setiap Gardu Induk

Trafo pada tiap-tiap gardu induk memiliki kapasitas daya yang berbeda-beda yang menyuplai setiap *feeder* atau penyulang pada sistem kelistrikan Timor Leste. Tabel 5.6 menunjukkan data trafo pada tiap-tiap gardu induk di Timor Leste.

Tabel 5.6

Data Trafo di setiap Gardu Induk di Timor Leste

No	Gardu Induk	Kapasitas Trafo (MVA)	Rasio Tegangan (kV)
1.	Dili	31,5 / 3 unit	150 /20
2.	Liquica	20 / 2 unit	150/20
3.	Maliana	10 / 2 unit	150 /20
4.	Suai	20 / 2 unit	150 /20
5.	Betano	10 / 2 unit	150 /20
6.	Viqueque	10 / 2 unit	150 /20
7.	Lospalos	10 / 2 unit	150 /20
8.	Baucau	31,5 / 3 unit	150 /20
9.	Manatuto	20 / 2 unit	150/20

Sumber : Data EDTL, 2015.

5.3.3 Data Saluran Transmisi 150 kV

Saluran transmisi Timor Leste memiliki panjang saluran udara tegangan tinggi sejauh 504,58 kms (kilometer sirkuit) yang terdiri dari beberapa jenis penghantar. Berikut ditunjukkan pada Tabel 5.7 data jenis penghantar, luas penampang dan panjang saluran pada sistem kelistrikan 150 kV. Panjang saluran transmisi terpendek, menghubungkan antara PLTD Hera dengan gardu induk Dili sepanjang 10,38 km. Sedangkan saluran transmisi yang terjauh menghubungkan antara gardu induk Lospalos dengan gardu induk Viqueque sepanjang 104 km. Berikut data resistansi, reaktansi dan kapasitansi saluran transmisi 150 kV ditunjukkan pada Lampiran 10.

Tabel 5.7

Data Saluran Sistem Kelistrikan 150 kV Timor Leste

No.	GI	P.P Hera	Dili	Liquica	Maliana	Suai	Betano	P.P Betano	Viqueque	Baucau	Lospalos	Manatuto
1.	P.P Hera		10,38									42,94
2.	Dili	10,38		40,55								
3.	Liquica		40,55		45							
4.	Malian			45		58,18						
5.	Suai				58,18		38,5					
6.	Betano					38,5		25,3				
7.	P.P Batno						25,3		84,5			
8.	Viqueque							84,5		44	104	
9.	Baucau								44		63,3	54,17
10.	Lospalos								104			
11.	Mantuto									54,17		

Sumber : Data EDTL, 2015.

Pada Tabel 5.7 tersebut, nilai yang ada merupakan panjang saluran dalam kilometer, dengan jenis penghantar adalah *Single Circuit Line AAC/S* dan *Single-Double Circuit Line AAC/S*, dengan luas penampang 240 mm².

5.3.4 Data Beban setiap Gardu Induk

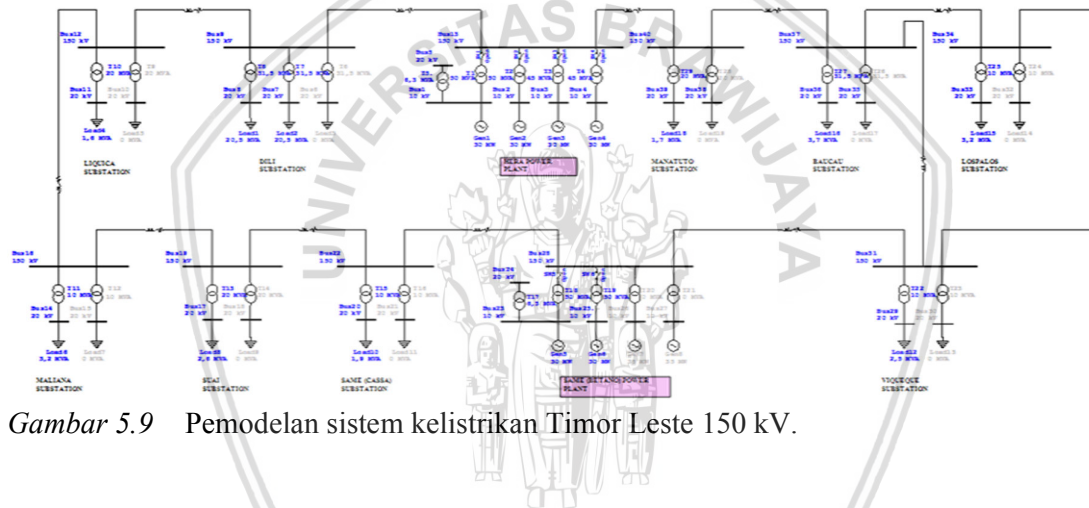
Tabel 5.8 menunjukkan data beban puncak setiap gardu induk, di mana beban puncak yang terbesar terjadi pada gardu induk Dili pada bulan April 2015 sebesar $P = 41,933$ MW. Untuk keperluan penelitian ini, data beban puncak yang akan di-input-kan ke dalam pemodelan, yaitu data beban puncak rerata mulai Januari 2015 hingga Mei 2015.

Tabel 5.8
Data Beban Puncak setiap Gardu Induk

Bulan	Dili	Liquica	Maliana	Suai	Betano	Viqueque	Baucau	Lospalos	Manatuto
Jan	40,837	1,519	3,121	4,111	1,622	2,429	3,531	2,794	1,644
Feb	40,183	1,507	3,228	2,181	1,721	2,345	3,622	2,961	1,633
Mar	40,822	1,565	3,281	2,215	1,713	2,474	3,866	2,992	1,69
Apr	41,933	1,587	3,266	2,261	1,705	2,535	3,683	4,438	1,633
Mei	40,746	1,633	3,334	2,261	1,652	2,573	3,744	3,053	1,656

Sumber : Data EDTL, 2015.

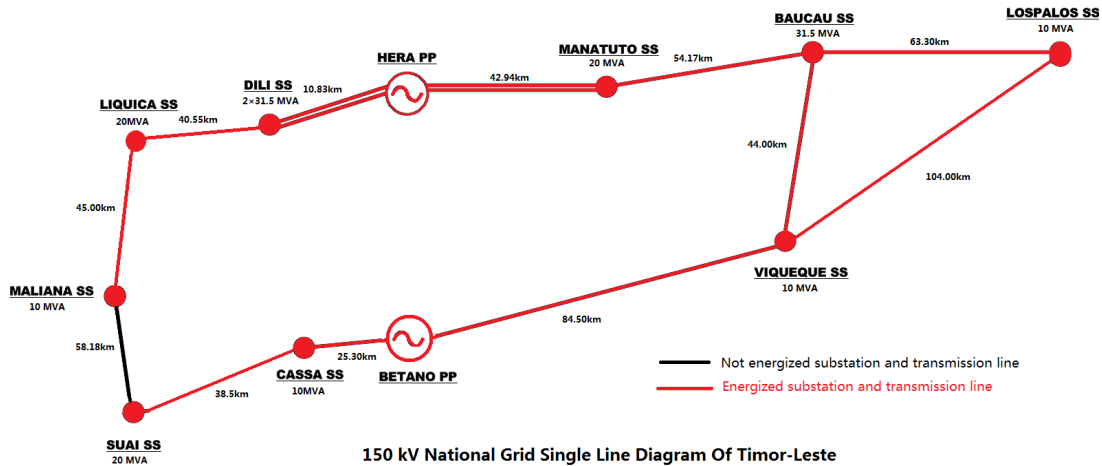
Pada Tabel 5.8 tersebut, nilai yang ada merupakan beban puncak dalam satuan MW. Dari diagram segaris dan data-data yang sudah didapatkan, selanjutnya dilakukan pemodelan sistem kelistrikan Timor Leste ke dalam *software ETAP* seperti yang terlihat pada Gambar 5.9.



Gambar 5.9 Pemodelan sistem kelistrikan Timor Leste 150 kV.

5.4 Hasil Analisis Aliran Daya sesudah Injeksi Pembangkit (Sistem 150 kV)

Analisis aliran daya sesudah injeksi pembangkit baru dilakukan dengan tiga skenario, skenario ke-1 yaitu pada saat injeksi PLTD Hera sebesar $P = 120$ MW, skenario ke-2 pada saat injeksi PLTD Betano sebesar $P = 130$ MW, dan skenario ke-3 pada saat injeksi dua pembangkit yaitu, PLTD Hera dan PLTD Betano sebesar $P = 250$ MW. Gambar 5.10 memperlihatkan lokasi injeksi kedua pembangkit (PLTD Hera dan PLTD Betano) pada sistem kelistrikan Timor Leste.



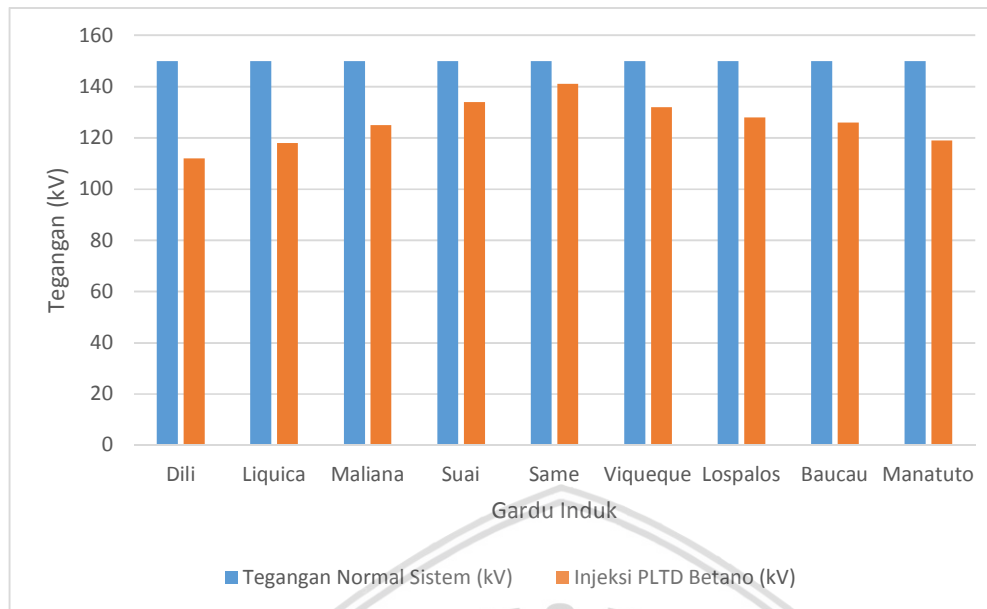
Gambar 5.10 Lokasi injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano pada sistem kelistrikan Timor Leste.

Sumber : Data EDTL, 2015.

Penentuan lokasi injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano berdasarkan pada rancangan pembangunan dan pengembangan sistem kelistrikan Timor Leste 150 kV. Di mana lokasi injeksi PLTD Hera dilakukan di distrik Dili, dengan alasan bahwa Dili merupakan ibukota negara Timor Leste, dan beban yang terbesar berada di distrik Dili. Lokasi injeksi PLTD Betano dilakukan di distrik Same, agar bisa menyuplai energi listrik wilayah lainnya yang letaknya cukup jauh dari PLTD Hera.

5.4.1 Injeksi PLTD Betano

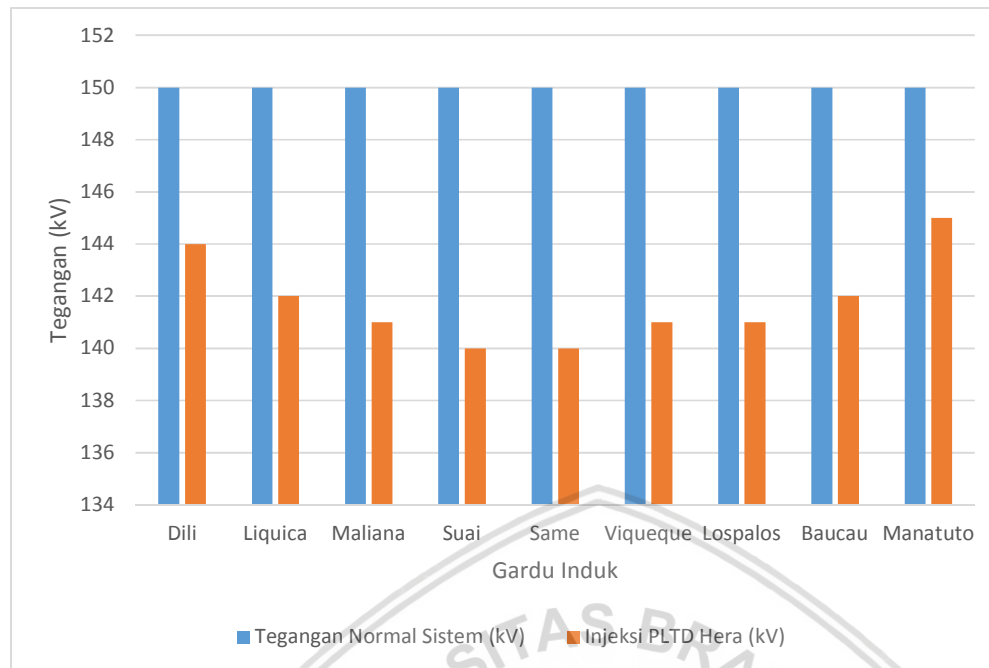
Hasil analisis aliran daya menunjukkan bahwa profil tegangan pada saat injeksi PLTD Betano hampir semua GI mengalami penurunan tegangan diluar standar yang ditetapkan yaitu +5% dan -10% untuk sistem 150 kV, kecuali GI Betano masih dalam batas yang ditetapkan yaitu sebesar -6 % atau $V = 141$ kV, salah satunya disebabkan jarak dari GI Betano ke PLTD Betano lebih dekat ($p = 25,30$ km) bila dibandingkan dengan GI yang lainnya. Penurunan tegangan yang tertinggi terjadi pada GI Dili sebesar -25% atau $V = 112$ kV, diikuti oleh GI Manatuto dan GI Liquica sebesar -21% atau $V = 119$ kV, GI Maliana -17% atau $V = 125$ kV, GI Baucau -16% atau $V = 126$ kV, GI Lospalos -15% atau $V = 128$ kV, GI Viqueque -12% atau $V = 132$ kV dan GI Suai -11% atau $V = 134$ kV. Profil tegangan pada saat injeksi PLTD Betano diperlihatkan pada Gambar 5.11.



Gambar 5.11 Profil tegangan pada setiap GI saat injeksi PLTD Betano.

5.4.2 Injeksi PLTD Hera

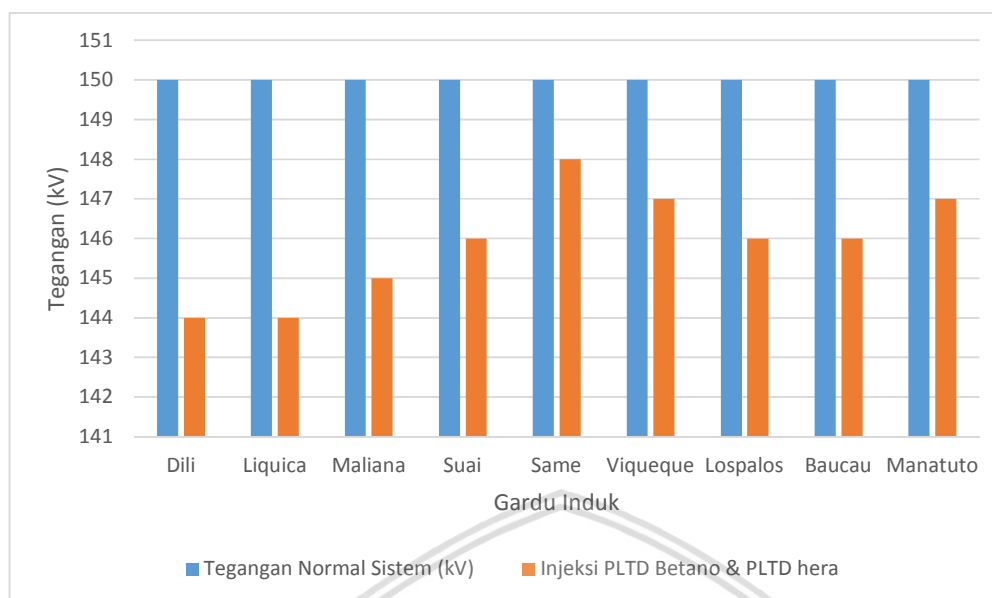
Hasil analisis aliran daya menunjukkan bahwa profil tegangan pada saat injeksi PLTD Hera, tegangan di sembilan gardu induk mengalami peningkatan. GI Dili yang semula penurunan tegangan -25 % menjadi -4%, GI Manatuto dari -21% menjadi -3%, GI Liquica dari -21% menjadi -5%, GI Maliana dari -17% menjadi -6%, GI Baucau dari -16% menjadi -5%, GI Lospalos dari -15% menjadi -6%, GI Viqueque dari -12% menjadi -6% dan GI Suai dari -11% menjadi -7%. Peningkatan nilai profil tegangan yang terbesar berada pada GI Dili dikarenakan lokasi PLTD Hera cukup dekat dengan GI Dili ($p = 10,38\text{km}$) dibandingkan dengan GI yang lain-nya. Profil tegangan pada saat injeksi PLTD Hera diperlihatkan pada Gambar 5.12.



Gambar 5.12 Profil tegangan pada setiap GI saat injeksi PLTD Hera.

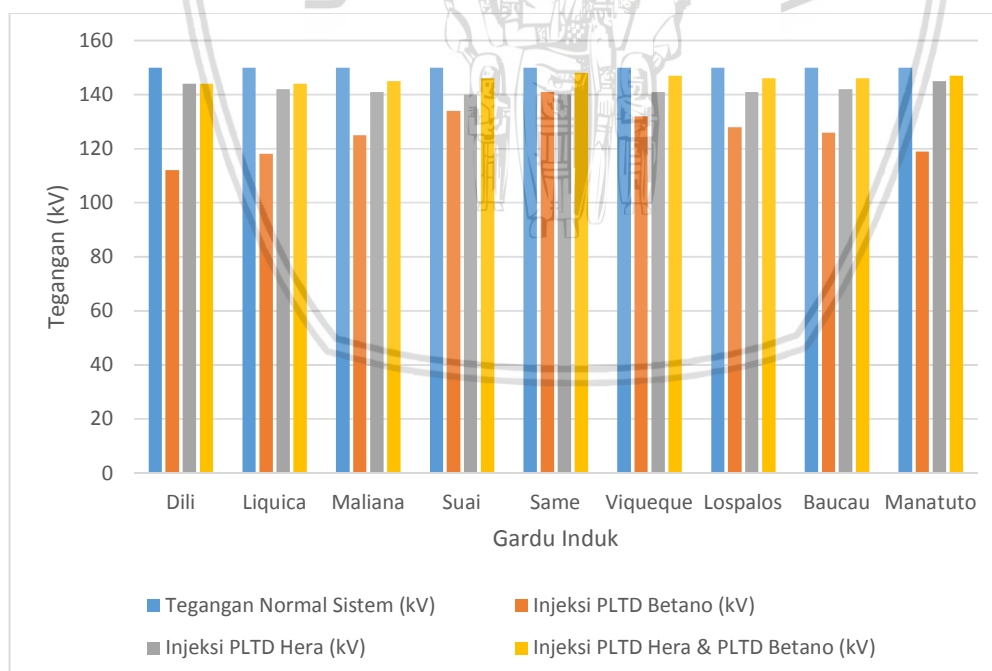
5.4.3 Injeksi PLTD Betano dan PLTD Hera

Hasil analisis aliran daya menunjukkan bahwa profil tegangan pada saat injeksi dua pembangkit yaitu PLTD Betano dan PLTD Hera, tegangan di sembilan gardu semakin meningkat. GI Dili yang semula penurunan tegangan -25 % menjadi -4%, GI Manatuto dari -21% menjadi -2%, GI Liquica dari -21% menjadi -4%, GI Maliana dari -17% menjadi -3%, GI Baucau dari -16% menjadi -3% , GI Lospalos dari -15% menjadi -3%, GI Viqueque dari -12% menjadi -2%, GI Suai dari -11% menjadi -3% dan GI Betano dari -6% menjadi -1%. Profil tegangan pada saat injeksi PLTD Betano dan PLTD Hera dapat dilihat pada Gambar 5.13.



Gambar 5.13 Profil tegangan pada setiap GI saat injeksi PLTD Betano dan PLTD Hera.

Gambar 5.14 memperlihatkan grafik profil tegangan untuk tiga skenario injeksi pembangkit. Dan Tabel 5.9 memperlihatkan perbandingan nilai profil tegangan untuk tiga skenario injeksi pembangkit.



Gambar 5.14 Profil tegangan untuk tiga skenario injeksi pembangkit.

Tabel 5.9

Perbandingan Nilai Profil Tegangan untuk Tiga Skenario Injeksi Pembangkit Hasil Simulasi

Gardu Induk	Tegangan Normal Sistem (kV)	Skenario Injeksi (kV)		
		Injeksi PLTD Betano	Injeksi PLTD Hera	Injeksi PLTD Betano & Hera
Dili	150	112	144	144
Liquica	150	118	142	144
Maliana	150	125	141	145
Suai	150	134	140	146
Betano	150	141	140	148
Viqueque	150	132	141	147
Lospalos	150	128	141	146
Baucau	150	126	142	146
Manatuto	150	119	145	147

5.4.4 Rugi-Rugi Daya (Power Losses) untuk Tiga Skenario Injeksi

Hasil analisis aliran daya sistem kelistrikan Timor Leste 150 kV untuk tiga skenario injeksi pembangkit diperoleh perbandingan nilai total *losses* yang terjadi pada sistem kelistrikan Timor Leste, seperti halnya ditampilkan di Tabel 5.10.

Tabel 5.10

Perbandingan Total Losses pada Sistem Kelistrikan Timor Leste Hasil Simulasi

Hasil Aliran Daya dan Losses	Skenario Injeksi Pembangkit		
	Injeksi PLTD Betano	Injeksi PLTD Hera	Injeksi PLTD Betano & PLTD Hera
Total Pembangkitan			
Daya aktif (MW)	34,864	43,708	44,546
Daya reaktif (MVAR)	19,742	23,454	22,64
Total Pembebanan			
Daya aktif (MW)	28,997	42,211	43,466
Daya reaktif (MVAR)	20,131	29,691	30,499
Total Losses			
Daya aktif (MW)	5,867	1,497	1,08
Data reaktif (MVAR)	-0,389	-6,237	-7,859
Prosentase Losses			

Hasil Aliran Daya dan <i>Losses</i>	Skenario Injeksi Pembangkit		
	Injeksi PLTD Betano	Injeksi PLTD Hera	Injeksi PLTD Betano & PLTD Hera
Daya aktif (%)	16,83	3,43	2,42
Daya reaktif (%)	-1,97	-26,59	-34,71

Dari perbandingan total *losses* pada sistem kelistrik Timor Leste untuk tiga skenario injeksi pembangkit (Injeksi PLTD Betano, injeksi PLTD Hera, injeksi PLTD Betano dan PLTD Hera), maka diperoleh hasil yaitu pada saat diinjeksikan PLTD Betano, *losses* daya aktif senilai 16,83 % dan untuk daya reaktif senilai -1,97%. Sewaktu terjadi injeksi PLTD Hera *losses* daya aktif turun menjadi sebesar 3,43% dan daya reaktif sebesar -26,59 %. Pada saat injeksi ke-dua pembangkit yaitu PLTD Betano dan PLTD Hera *losses* daya aktif semakin menurun menjadi sebesar 2,42 % dan daya reaktif sebesar -34,71 %.

5.5 Analisis Kestabilan Sistem Tenaga

Analisis kestabilan sistem tenaga dilakukan untuk mengetahui kemampuan yang dimiliki sistem apakah bisa kembali stabil setelah mengalami gangguan, dalam hal ini disturbansi yang diberikan yaitu disturbansi hubungan singkat tiga fasa. Disturbansi hubungan singkat tiga fasa diskenariokan terjadi di Dili Substation (bus-9), Liquica Substation (bus-12), Manatuto Substation (bus-40) dan Baucau Substation (bus-37) pada saat kondisi sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano. Kestabilan sistem tenaga yang dibahas pada penelitian ini meliputi kestabilan sudut rotor, kestabilan frekuensi dan kestabilan tegangan sewaktu adanya disturbansi hubung singkat 3 fasa.

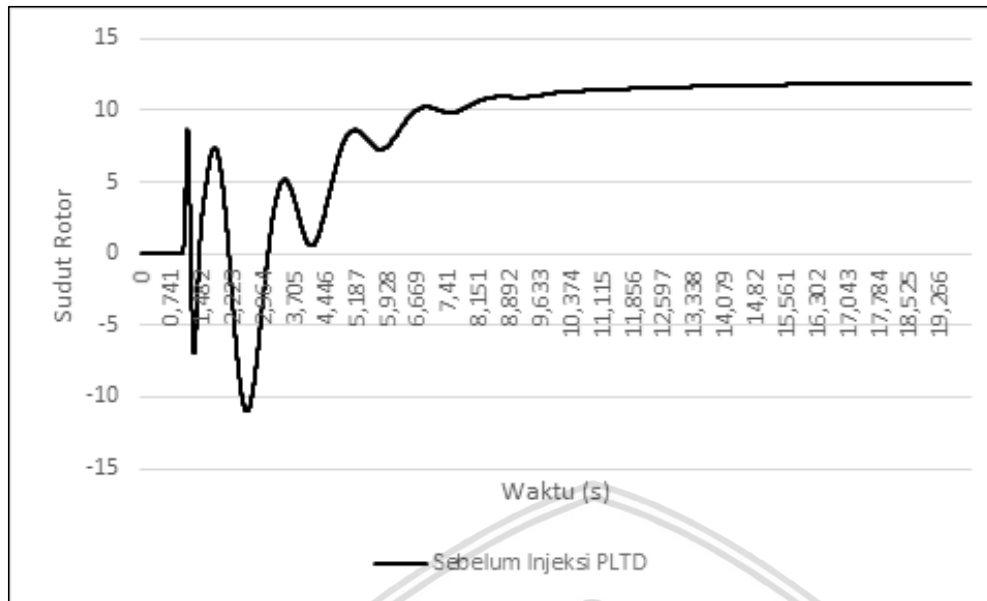
5.5.1 Kestabilan Sistem Tenaga sebelum Injeksi PLTD Betano

1. Fault di Disi Substation

Hasil simulasi kestabilan sistem tenaga sebelum injeksi PLTD Betano diuraikan sebagai berikut.

a. Kestabilan Sudut Rotor

Hasil simulasi kestabilan sudut rotor pra injeksi PLTD Betano diperlihatkan pada Gambar 5.15.

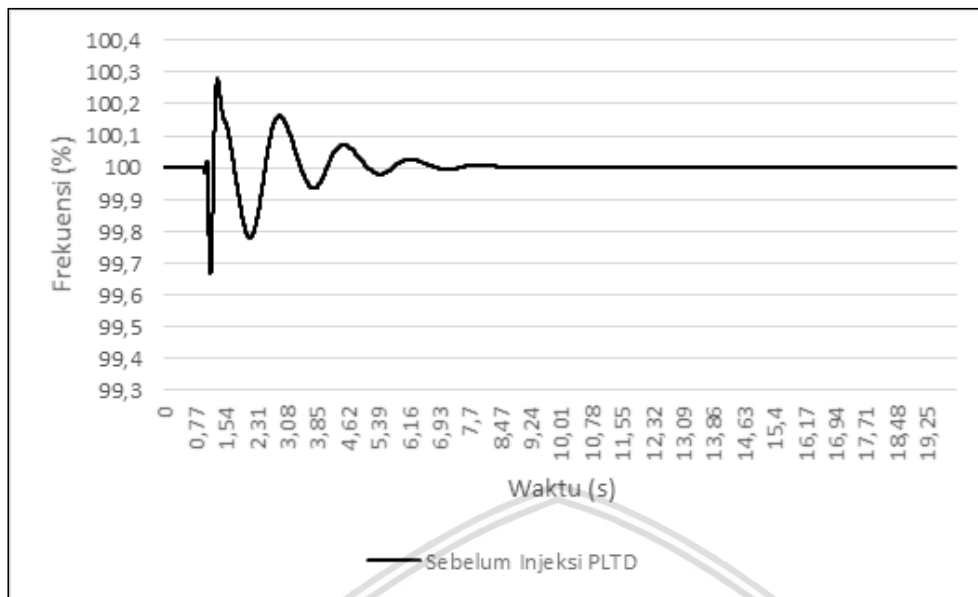


Gambar 5.15 Kestabilan sudut rotor sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Dili Substation).

Grafik hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa sebelum terjadi gangguan sudut rotor awal bernilai 0° . Setelah terjadi gangguan pada $t = 1$ detik sudut rotor mengalami perubahan menjadi $11,76^{\circ}$, dengan waktu pemulihan $t = 15,326$ detik.

b. Kestabilan Frekuensi

Hasil simulasi kestabilan frekuensi pra injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.16.

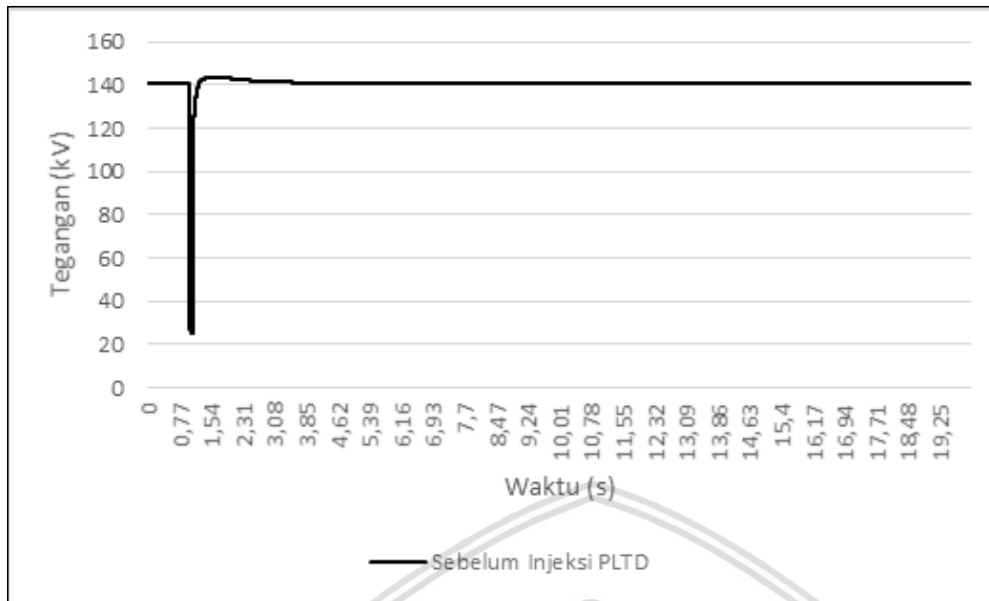


Gambar 5.16 Kestabilan frekuensi sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Dili Substation).

Hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa kondisi awal sistem bekerja pada frekuensi normal yaitu 50 Hz sebelum terjadi gangguan. Setelah terjadi gangguan pada $t = 1$ detik, frekuensi sistem mengalami osilasi sampai pada $t = 8,47$ detik. Setelah $t = 8,47$ detik sistem kembali normal dengan frekuensi 50 Hz.

c. Kestabilan Tegangan

Hasil simulasi stabilitas tegangan sebelum injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.17.



Gambar 5.17 Kestabilan tegangan sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Dili Substation).

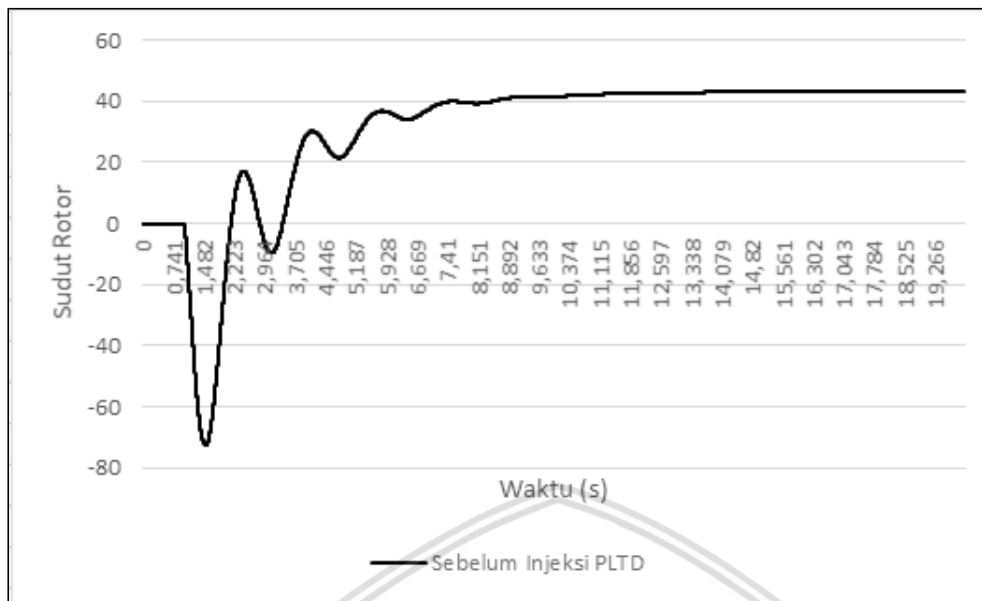
Hasil simulasi di atas menunjukkan pada kondisi awal sistem sebelum terjadi gangguan, tegangan bus-13 masih di atas standar yang ditetapkan yaitu $V = 140,8$ kV. Pada saat terjadi gangguan di Dili Substation detik ke-1 terjadi penurunan tegangan menjadi sebesar $V = 32,03$ kV dengan waktu pemulihan normal $t = 3,64$ detik.

2. Fault di Liquica Substation

Hasil simulasi kestabilan sistem tenaga sebelum injeksi PLTD Betano diuraikan sebagai berikut.

a. Kestabilan Sudut Rotor

Hasil simulasi kestabilan sudut rotor pra injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.18.

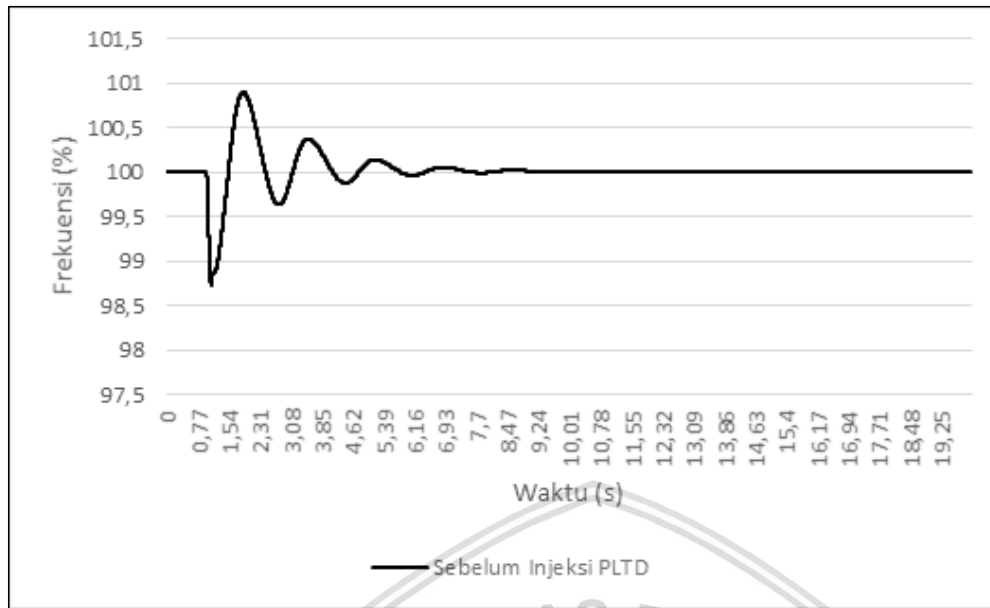


Gambar 5.18 Kestabilan sudut rotor sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Liquica Substation).

Grafik hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa sebelum terjadi gangguan sudut rotor awal bernilai 0° . Setelah terjadi gangguan pada $t = 1$ detik sudut rotor mengalami perubahan menjadi $42,98^{\circ}$, dengan waktu pemulihan $t = 14,07$ detik.

b. Kestabilan Frekuensi

Hasil simulasi kestabilan frekuensi pra injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.19.

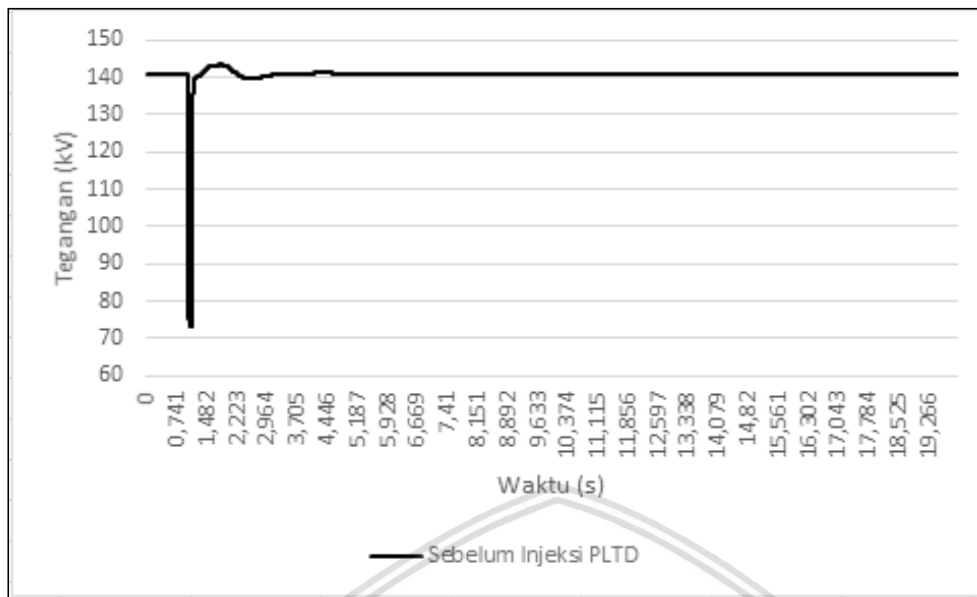


Gambar 5.19 Kestabilan frekuensi sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Liquica Substation).

Grafik hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa kondisi awal sistem bekerja pada frekuensi normal sebesar 50 Hz sebelum terjadinya disturbansi. Setelah terjadi gangguan sewaktu $t=1$ detik, frekuensi sistem mengalami osilasi sampai pada $t = 9,05$ detik. Setelah $t = 9,05$ detik sistem kembali normal dengan frekuensi 50 Hz.

c. Kestabilan Tegangan

Hasil simulasi kestabilan tegangan sebelum injeksi PLTD Betano ditampilkan pada Gambar 5.20.



Gambar 5.20 Kestabilan tegangan sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Liquica Substation).

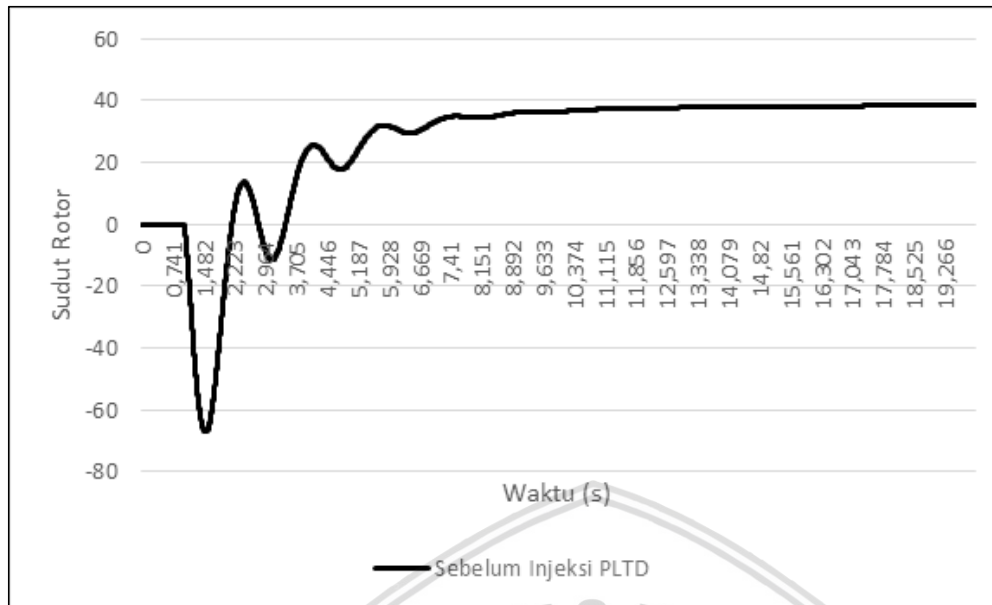
Grafik hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa, pada kondisi awal sistem sebelum terjadi gangguan tegangan bus-13 masih di atas standar yang ditetapkan yaitu $V = 140,8$ kV. Pada saat terjadi gangguan di Liquica substation detik ke-1 terjadi penurunan tegangan menjadi sebesar $V = 81,97$ kV dengan waktu pemulihan normal $t = 4,35$ detik.

3. Fault di Manatuto Substation

Hasil simulasi kestabilan sistem tenaga sebelum injeksi PLTD Betano diuraikan sebagai berikut.

a. Kestabilan Sudut Rotor

Hasil simulasi kestabilan sudut rotor pra injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.21.

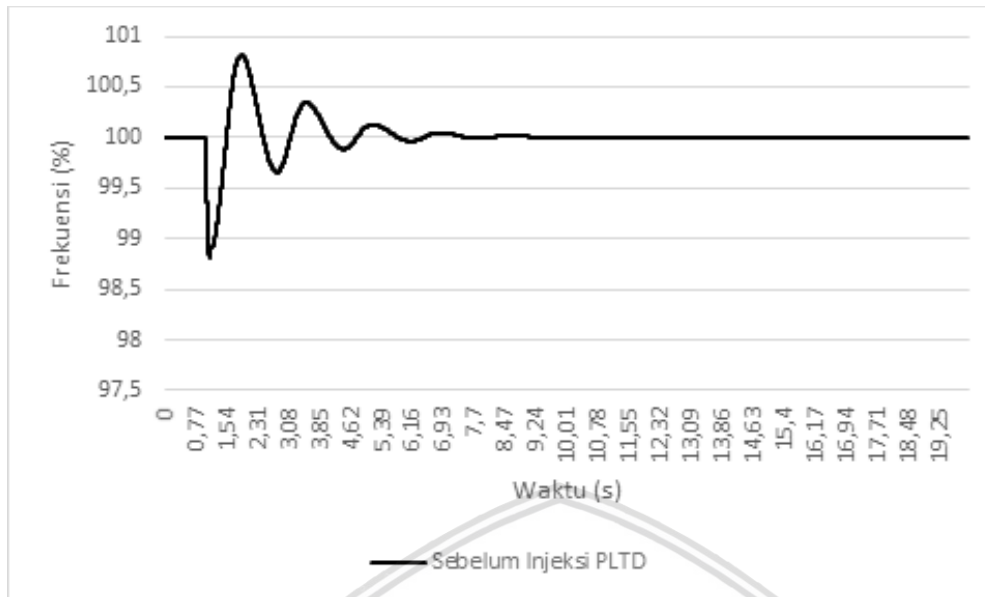


Gambar 5.21 Kestabilan sudut rotor sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Manatuto Substation).

Grafik hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa sebelum terjadi gangguan sudut rotor awal bernilai 0° . Setelah terjadi gangguan pada $t = 1$ detik sudut rotor mengalami perubahan menjadi $38,29^\circ$, dengan waktu pemulihan $t = 17,43$ detik.

b. Kestabilan Frekuensi

Hasil simulasi kestabilan frekuensi pra injeksi PLTD Betano ditampilkan pada Gambar 5.22.

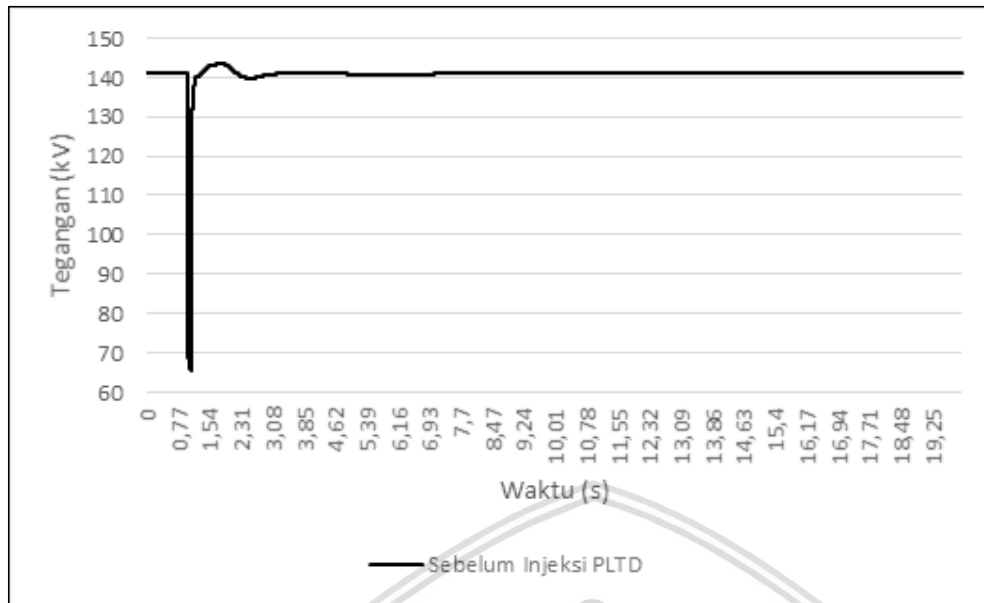


Gambar 5.22 Kestabilan frekuensi sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Manatuto Substation).

Grafik hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa kondisi awal sistem bekerja pada frekuensi normal senilai 50 Hz sebelum terjadinya disturbansi. Setelah terjadi gangguan pada $t = 1$ detik, frekuensi sistem mengalami osilasi sampai padat = 9,08 detik. Setelah $t = 9,08$ detik sistem kembali normal dengan frekuensi 50 Hz.

c. Kestabilan Tegangan

Hasil simulasi kestabilan tegangan sebelum injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.23.



Gambar 5.23 Kestabilan tegangan sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Manatuto Substation).

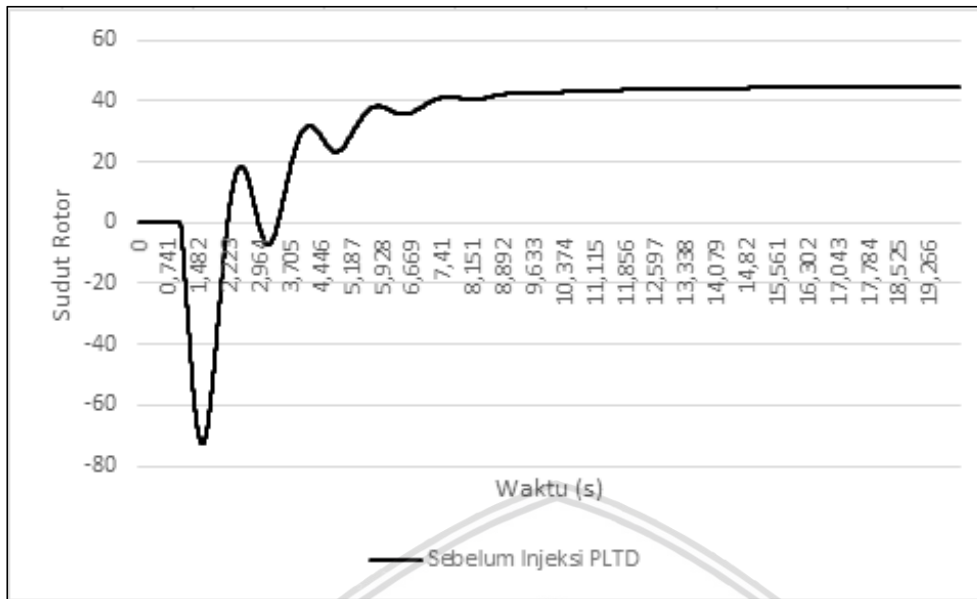
Grafik hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa, pada kondisi awal sistem sebelum terjadi gangguan tegangan bus-13 masih di atas standar yang ditetapkan yaitu $V = 140,8$ kV. Pada saat terjadi gangguan di Manatuto substation $t = 1$ detik terjadi penurunan tegangan menjadi sebesar $V = 74,86$ kV dengan waktu pemulihan normal $t = 7,21$ detik.

4. Fault di Baucau Substation

Hasil simulasi kestabilan sistem tenaga sebelum injeksi PLTD Betano diuraikan sebagai berikut.

a. Kestabilan Sudut Rotor

Hasil simulasi kestabilan sudut rotor pra injeksi PLTD Betano disajikan pada Gambar 5.24.

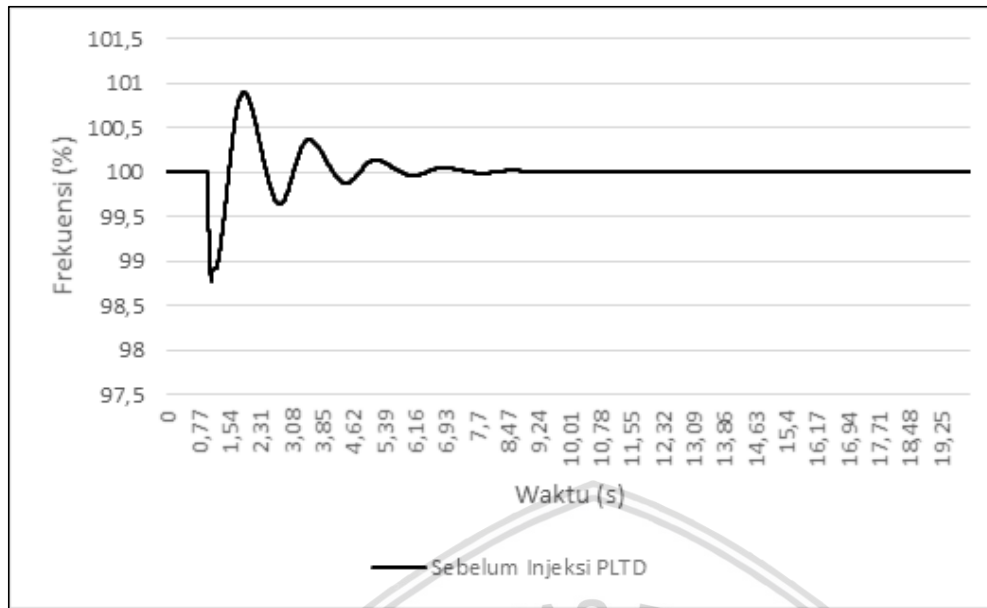


Gambar 5.24 Kestabilan sudut rotor sebelum injeksi PLTD Betano(fault pada Baucau Substation).

Grafik hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa sebelum terjadi gangguan sudut rotor awal bernilai 0° . Setelah terjadi gangguan pada $t = 1$ detik sudut rotor mengalami perubahan menjadi $44,3^{\circ}$, dengan waktu pemulihan $t = 15$ detik.

b. Kestabilan Frekuensi

Hasil simulasi kestabilan frekuensi pra injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.25.

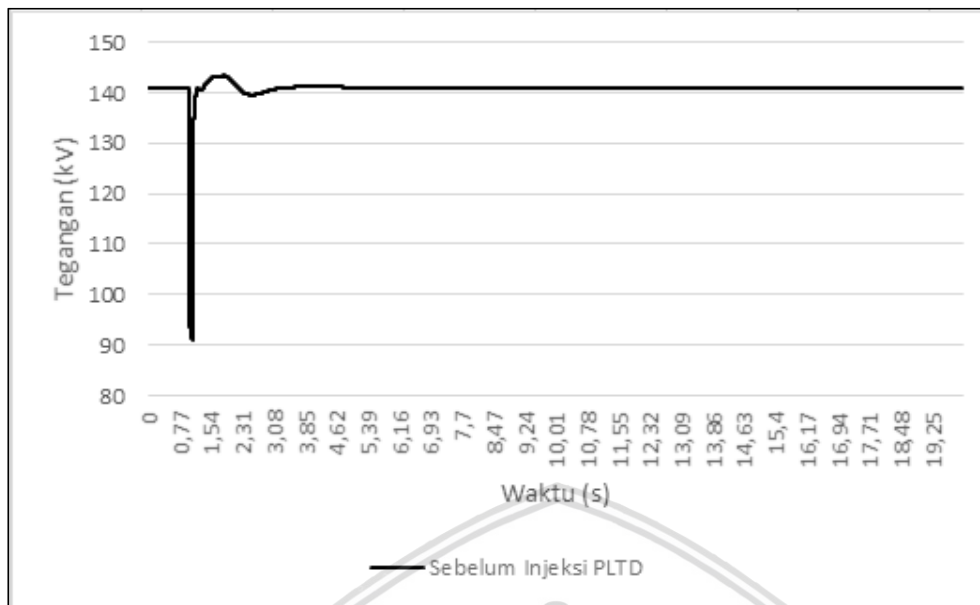


Gambar 5.25 Kestabilan frekuensi sebelum injeksi PLTD Betano(fault pada Baucau Substation).

Grafik hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa kondisi awal sistem bekerja pada frekuensi normal sebesar 50 Hz sebelum terjadinya disturbansi. Setelah terjadi gangguan pada $t = 1$ detik, frekuensi sistem mengalami osilasi sampai padat = 9 detik. Setelah $t = 9$ detik sistem kembali normal dengan frekuensi 50 Hz.

c. Kestabilan Tegangan

Hasil simulasi kestabilan tegangan sebelum injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.26.



Gambar 5.26 Kestabilan tegangan sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Baucau Substation).

Grafik hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa pada kondisi awal sistem sebelum terjadi gangguan tegangan bus-13 masih di atas standar yang ditetapkan yaitu $V = 140,8$ kV. Pada saat terjadi gangguan di Manatuto substation $t = 1$ detik, terjadi penurunan tegangan menjadi sebesar $V = 98,45$ kV dengan waktu pemulihan $t = 5$ detik.

5.5.2 Kestabilan Sistem sesudah Injeksi PLTD Betano

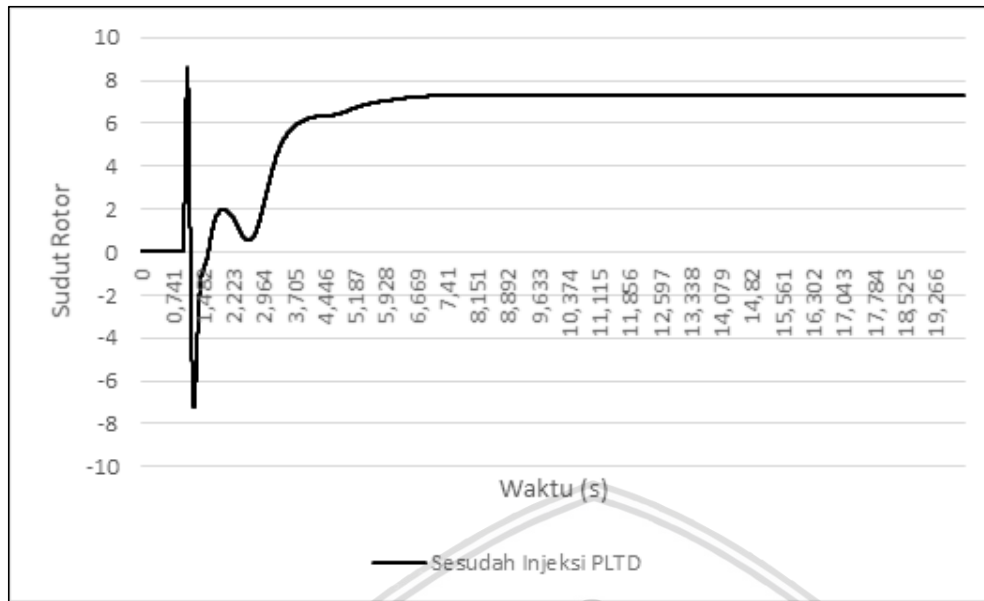
Injeksi PLTD Betano dilakukan pada detik ke-1 dengan kapasitas daya sebesar 130 MW dan diinjeksikan melalui bus-28 (bus 150 kV).

1. Fault di Dili Substation

Hasil simulasi kestabilan sistem tenaga sesudah injeksi PLTD Betano diuraikan sebagai berikut.

a. Kestabilan Sudut Rotor

Hasil simulasi kestabilan sudut rotor sesudah injeksi PLTD Betano diperlihatkan pada Gambar 5.27.

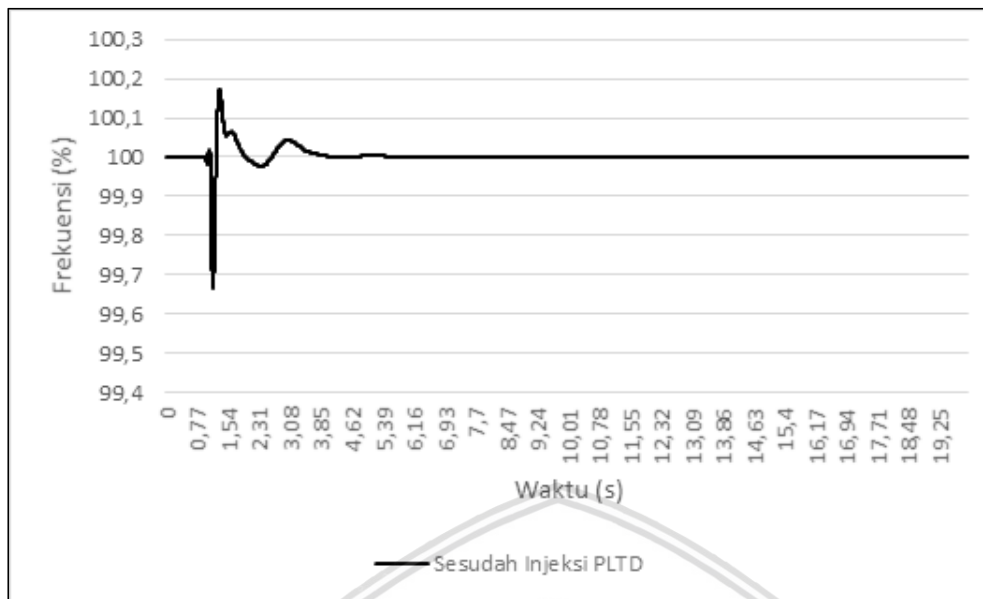


Gambar 5.27 Kestabilan sudut rotor sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Dili Substation).

Hasil simulasi di atas menunjukkan kondisi kerja awal sudut rotor 0° sebelum terjadi gangguan pada $t = 1$ detik. Setelah terjadi gangguan pada $t = 1$ detik terjadi perubahan sudut rotor menjadi $7,27^\circ$ dengan waktu pemulihan $t = 7,12$ detik.

b. Kestabilan Frekuensi

Hasil simulasi kestabilan frekuensi sesudah injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.28.

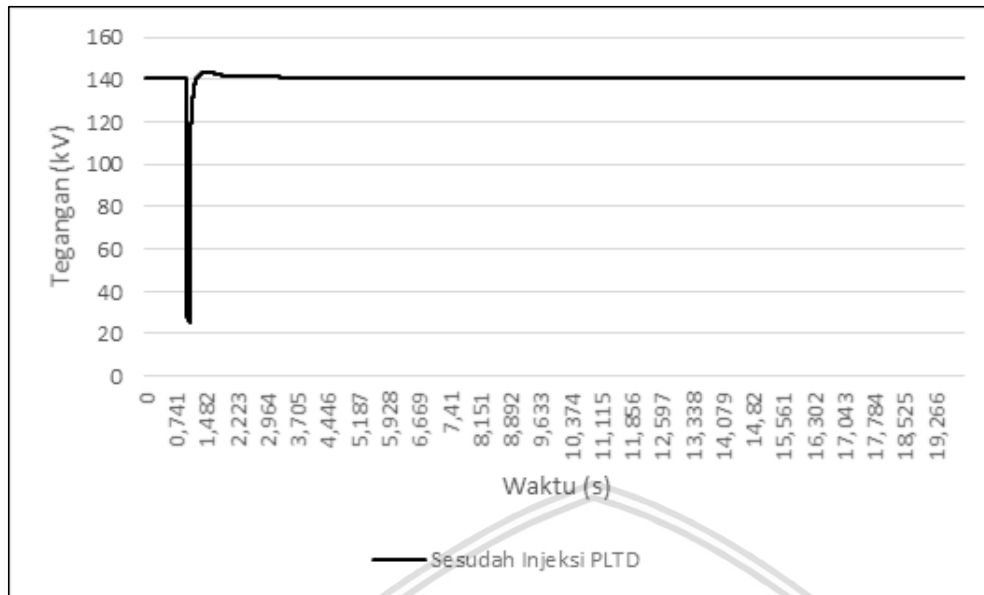


Gambar 5.28 Kestabilan frekuensi sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Dili substation).

Hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa kondisi awal sistem bekerja pada frekuensi normal sebesar 50 Hz sebelum terjadinya disturbansi pada $t = 1$ detik. Setelah $t = 1$ detik, frekuensi sistem mengalami osilasi sampai pada $t = 5,62$ detik. Setelah $t = 5,62$ detik sistem kembali normal dengan frekuensi 50 Hz.

c. Kestabilan Tegangan

Hasil simulasi kestabilan tegangan sesudah injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.29.



Gambar 5.29 Kestabilan tegangan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Dili Substation).

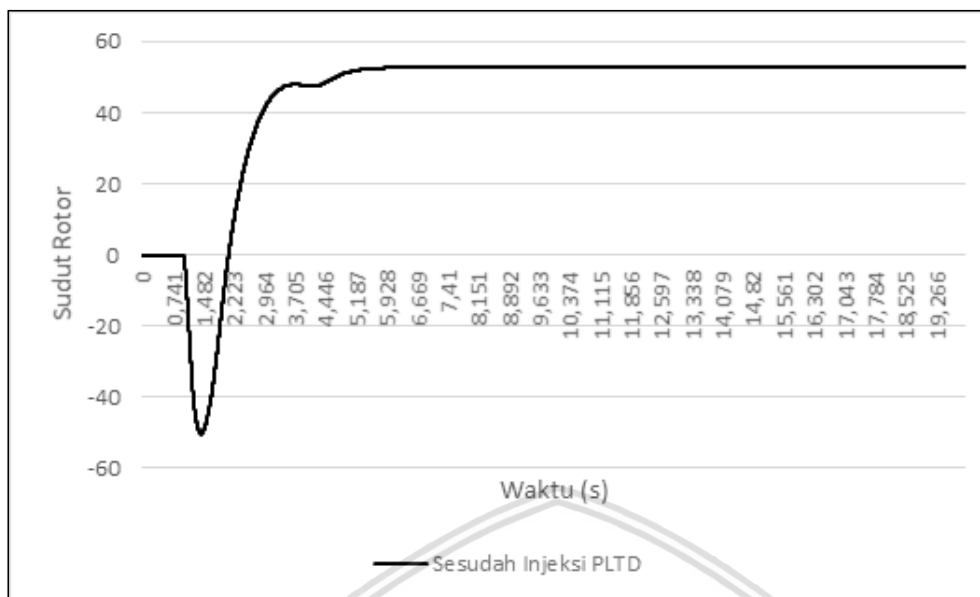
Grafik hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa pada kondisi awal sistem sebelum terjadi gangguan, tegangan bus 13 masih di atas standar yang ditetapkan yaitu $V = 140,8$ kV. Pada saat terjadi gangguan di Dili Substation detik ke-1 terjadi penurunan tegangan menjadi sebesar $V = 32$ kV dan dapat kembali stabil pada tegangan kerja yaitu $V = 140,8$ dengan waktu pemulihan $t = 3,58$ detik.

2. Fault di Liquica Substation

Hasil simulasi kestabilan sistem tenaga sesudah injeksi PLTD Betano diuraikan sebagai berikut.

a. Kestabilan Sudut Rotor

Hasil simulasi kestabilan sudut rotor sesudah injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.30.

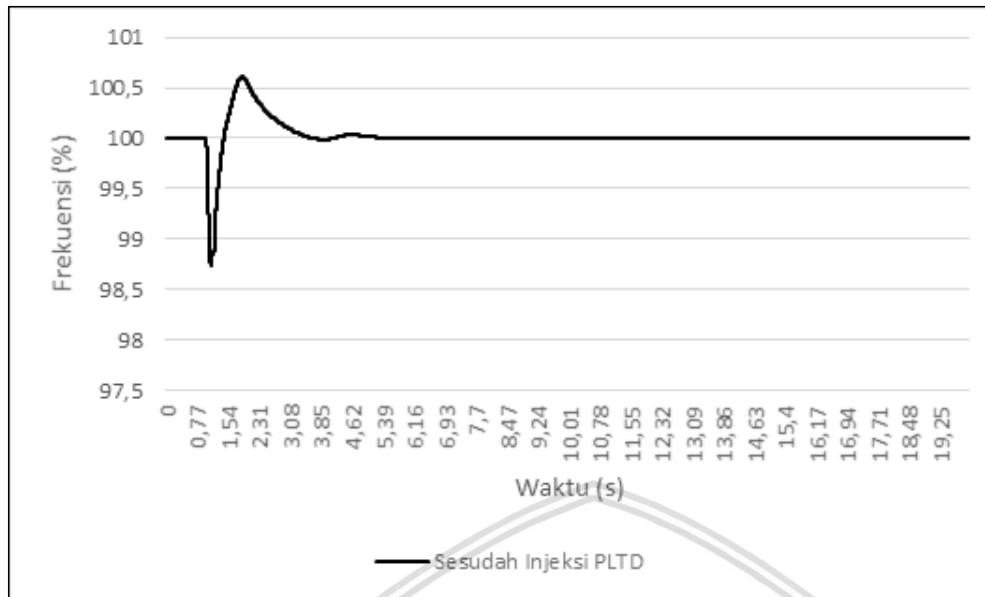


Gambar 5.30 Kestabilan sudut rotor sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Liquica Substation).

Hasil simulasi di atas menunjukkan kondisi kerja awal sudut rotor 0° sebelum terjadi gangguan pada $t = 1$ detik. Setelah terjadi gangguan pada $t = 1$ detik terjadi perubahan sudut rotor menjadi $52,56^\circ$ dengan waktu pemulihan $t = 6,03$ detik.

b. Kestabilan Frekuensi

Hasil simulasi kestabilan frekuensi sesudah injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.31.

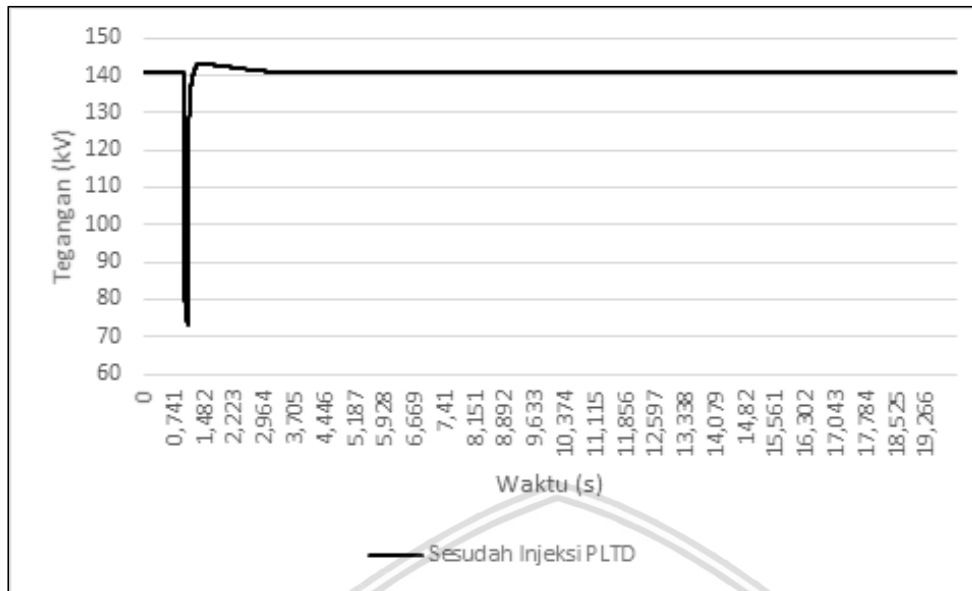


Gambar 5.31 Kestabilan frekuensi sesudah injeksi PLTD Betano(fault pada Liquica Substation).

Hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa kondisi awal sistem bekerja pada frekuensi normal senilai 50 Hz sebelum terjadinya disturbansi pada $t = 1$ detik. Setelah $t = 1$ detik, frekuensi sistem mengalami osilasi sampai pada $t = 5,34$ detik sistem kembali normal dengan frekuensi 50 Hz.

c. Kestabilan Tegangan

Hasil simulasi kestabilan tegangan sesudah injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.32.



Gambar 5.32 Kestabilan tegangan sesudah injeksi PLTD Betano(fault pada Liquica Substation).

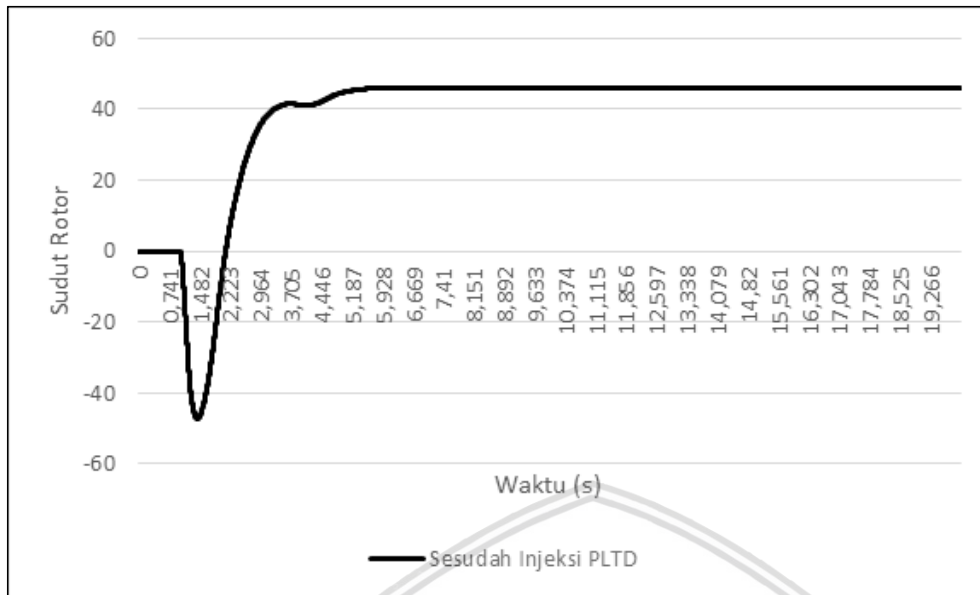
Grafik hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa pada kondisi awal sistem sebelum terjadi gangguan, tegangan bus 13 masih di atas standar yang ditetapkan yaitu $V = 140,8$ kV. Pada saat terjadi gangguan di Liquica Substation detik ke-1 terjadi penurunan tegangan menjadi sebesar $V = 81,9$ kV dan bisa dikembalikan kestabilannya pada tegangan operasional sebesar $V = 140,8$ dengan waktu pemulihan $t = 3,07$ detik.

3. Fault di Manatuto Substation

Hasil simulasi kestabilan sistem tenaga sesudah injeksi PLTD Betano diuraikan sebagai berikut.

a. Kestabilan Sudut Rotor

Hasil simulasi kestabilan sudut rotor sesudah injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.33.

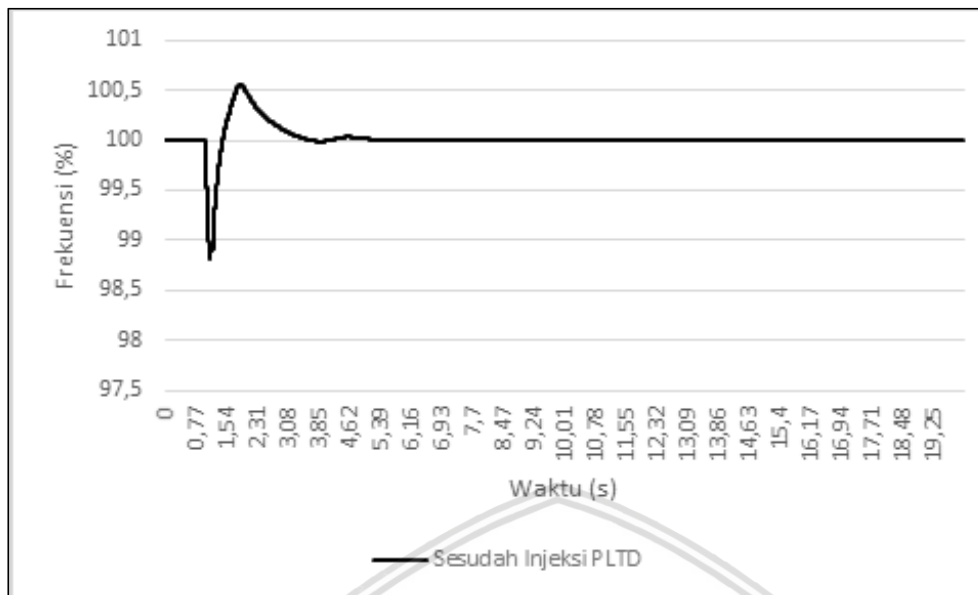


Gambar 5.33 Kestabilan sudut rotor sesudah injeksi PLTD Betano(fault pada Manatuto Substation).

Grafik hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa sebelum terjadi gangguan sudut rotor awal bernilai 0° . Setelah terjadi gangguan pada $t = 1$ detik sudut rotor mengalami perubahan menjadi $45,82^{\circ}$, dengan waktu pemulihan $t = 5,64$ detik.

b. Kestabilan Frekuensi

Hasil simulasi kestabilan frekuensi sesudah injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.34.

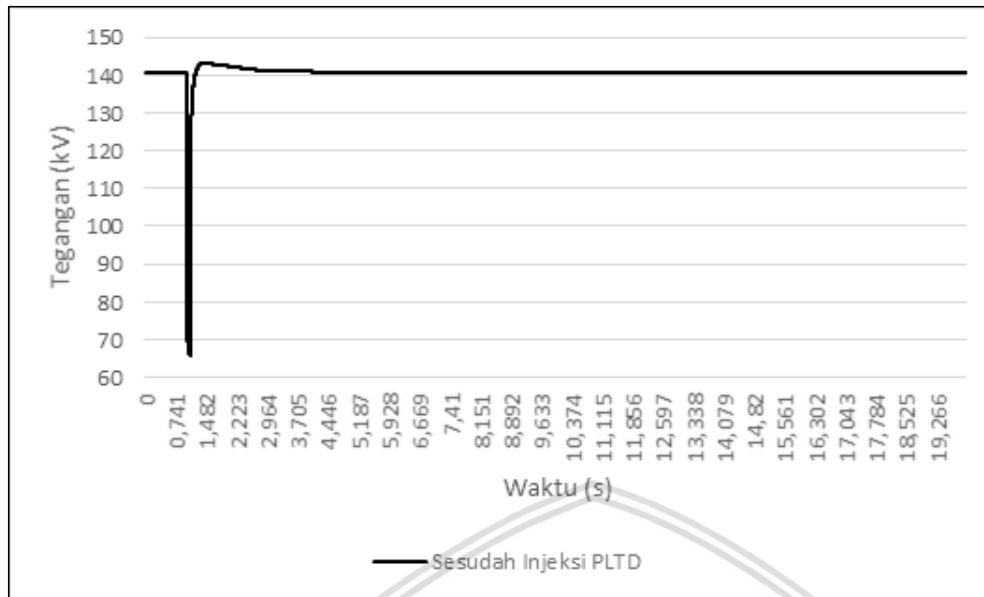


Gambar 5.34 Kestabilan frekuensi sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Manatuto Substation).

Grafik hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa kondisi awal sistem bekerja pada frekuensi normal senilai 50 Hz sebelum terjadinya disturbansi. Setelah terjadi gangguan pada $t = 1$ detik, frekuensi sistem mengalami osilasi sampai padat = 5,19 detik. Setelah $t = 5,19$ detik sistem kembali normal dengan frekuensi 50 Hz.

c. Kestabilan Tegangan

Hasil simulasi kestabilan tegangan sesudah injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.35.



Gambar 5.35 Kestabilan tegangan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Manatuto Substation).

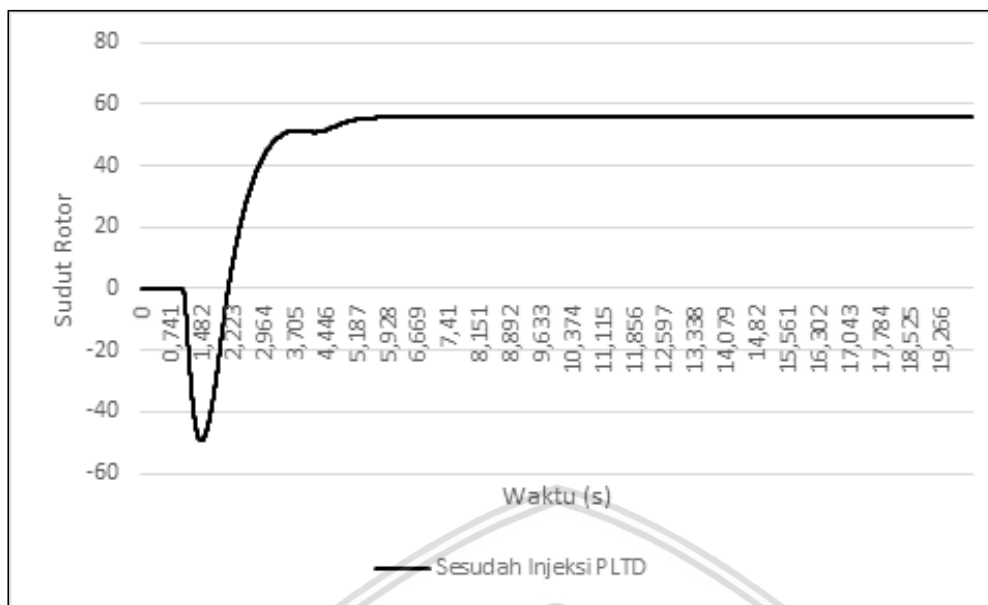
Grafik hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa pada kondisi awal sistem sebelum terjadi gangguan, tegangan bus 13 masih di atas standar yang ditetapkan yaitu $V = 140,8$ kV. Pada saat terjadi gangguan di Mantuto substation detik ke-1 terjadi penurunan tegangan menjadi sebesar $V = 74,8$ kV dan dapat kembali stabil pada tegangan kerja yaitu $V = 140,8$ dengan waktu pemulihan $t = 4,17$ detik.

4. Fault di Baucau Substation

Hasil simulasi kestabilan sistem tenaga sesudah injeksi PLTD Betano diuraikan sebagai berikut.

a. Kestabilan Sudut Rotor

Hasil simulasi kestabilan sudut rotor sesudah injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.36.

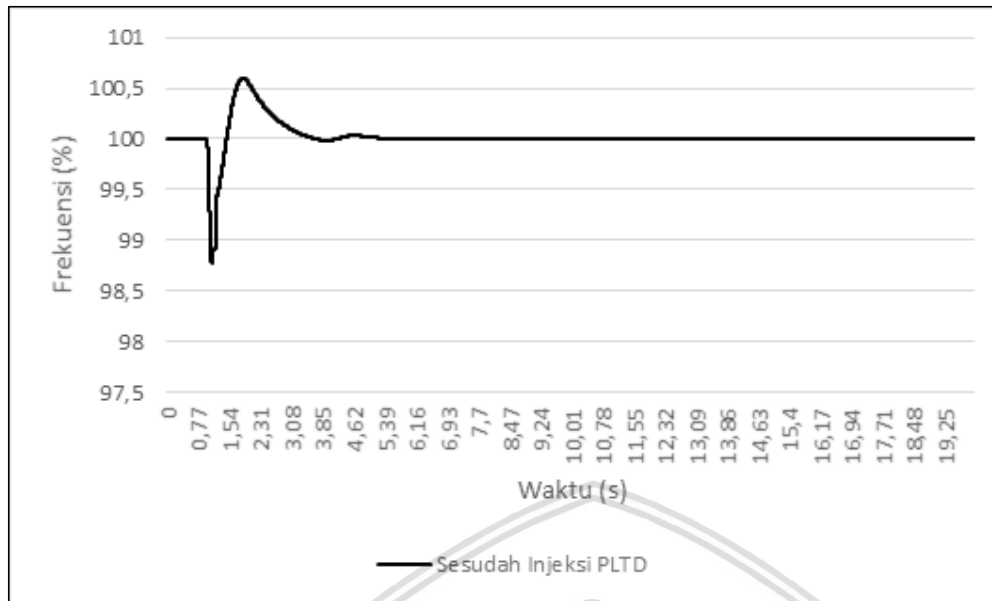


Gambar 5.36 Kestabilan sudut rotor sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Baucau Substation).

Grafik hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa sebelum terjadi gangguan sudut rotor awal bernilai 0° . Setelah terjadi gangguan pada $t = 1$ detik sudut rotor mengalami perubahan menjadi $55,32^{\circ}$ dengan waktu pemulihan $t = 5,41$ detik.

b. Kestabilan Frekuensi

Hasil simulasi kestabilan frekuensi sesudah injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.37.

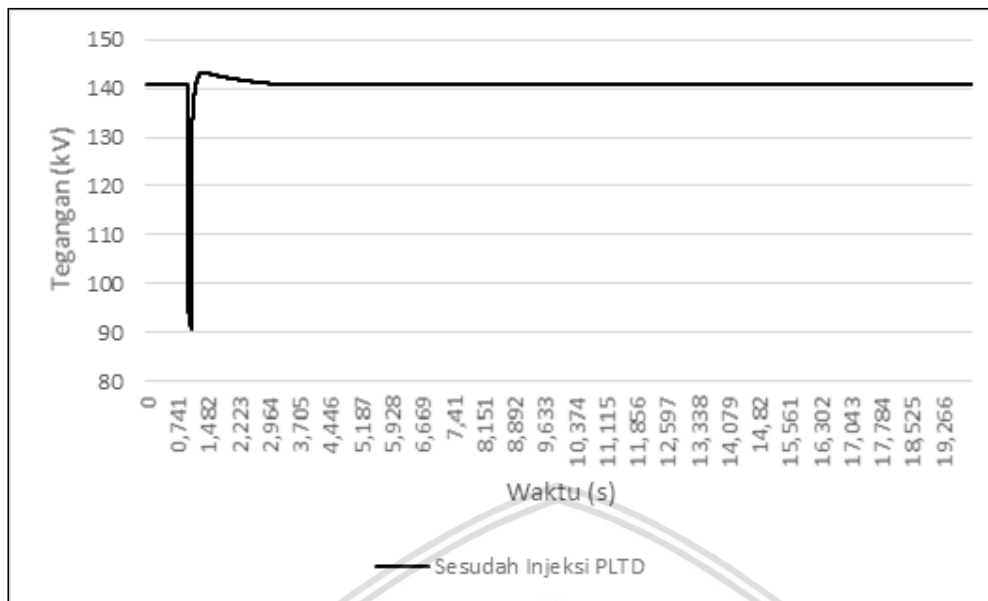


Gambar 5.37 Kestabilan frekuensi sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Baucau Substation).

Grafik hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa kondisi awal sistem bekerja pada frekuensi normal sebesar 50 Hz sebelum terjadinya disturbansi. Setelah terjadi gangguan pada $t = 1$ detik, frekuensi sistem mengalami osilasi sampai padat = 5,34 detik. Setelah $t = 5,34$ detik sistem kembali normal dengan frekuensi 50 Hz.

c. Kestabilan Tegangan

Hasil simulasi kestabilan tegangan sesudah injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.38.



Gambar 5.38 Kestabilan tegangan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Baucau Substation).

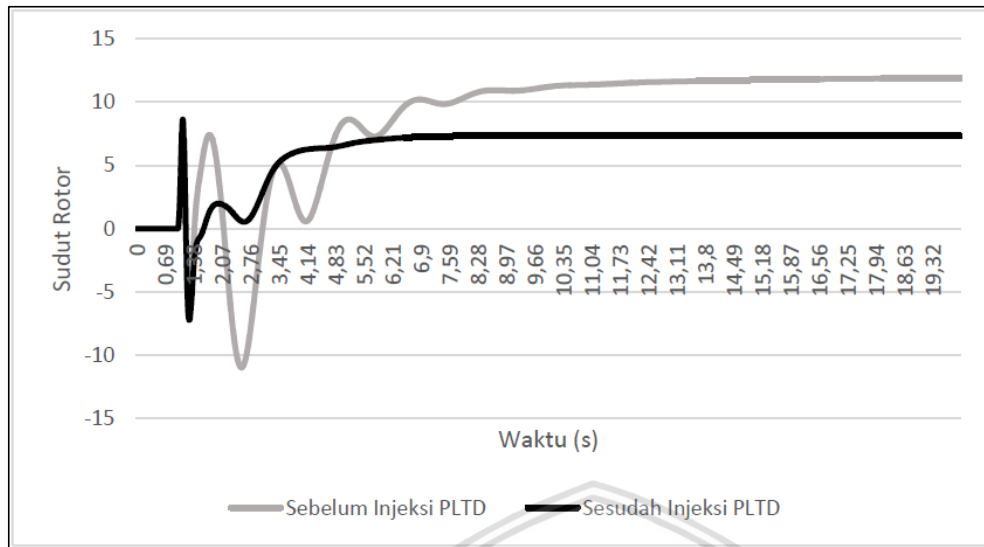
Grafik hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa pada kondisi awal sistem sebelum terjadi gangguan, tegangan bus-13 masih di atas standar yang ditetapkan yaitu $V = 140,8$ kV. Pada saat terjadi gangguan di Baucau Substation $t = 1$ detik, terjadi penurunan tegangan menjadi sebesar $V = 98,4$ kV dengan waktu pemulihan $t = 3,12$ detik.

5.5.3 Perbandingan Kestabilan Sebelum dan Sesudah injeksi Betano

1. Fault Dili Substation

a. Kestabilan Sudut Rotor

Hasil simulasi kestabilan sudut rotor pra dan pasca injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.39 dan Tabel 5.11.



Gambar 5.39 Perbandingan kestabilan sudut rotor sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Dili Substation).

Gambar 5.39 menunjukkan kestabilan sudut rotor mengalami osilasi lebih cepat sesudah injeksi PLTD Betano jika dibandingkan dengan sebelum injeksi. Waktu yang dibutuhkan sudut rotor generator untuk kembali dalam kondisi sinkron lebih cepat sesudah injeksi PLTD Betano.

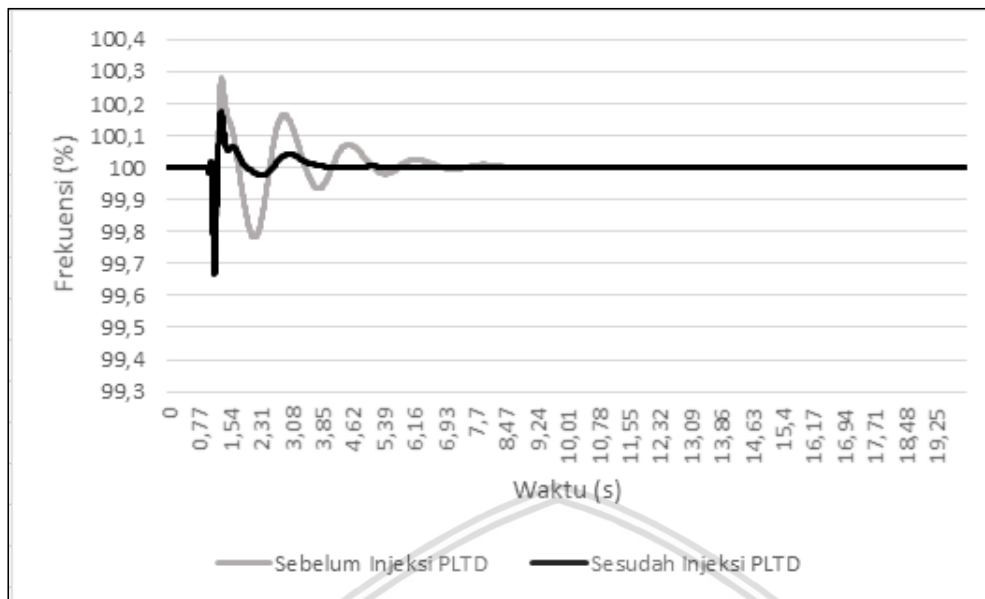
Tabel 5.11

Perbandingan Kestabilan Sudut Rotor Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Dili Substation)

Kondisi	$\delta_{awal} (^{\circ})$	$\delta_{baru} (^{\circ})$	$T_{pemulihan} (s)$
Sebelum injeksi PLTD Betano	0	11,76	15,32
Sesudah injeksi PLTD betano	0	7,27	7,12

b. Kestabilan Frekuensi

Hasil simulasi kestabilan frekuensi sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.40 dan Tabel 5.12.



Gambar 5.40 Perbandingan kestabilan frekuensi sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Dili Substation).

Grafik perbandingan kestabilan frekuensi sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano menunjukkan bahwa, sebelum terjadi gangguan pada $t = 1$ detik generator beroperasi di frekuensi normal senilai 50 Hz. Namun, setelah terjadinya disturbansi pada $t = 1$ detik frekuensi mengalami osilasi. Osilasi terbesar terjadi sebelum injeksi PLTD betano jika dibandingkan dengan sesudah injeksi, dan waktu pemulihan frekuensi kembali normal jauh lebih cepat pada saat sesudah injeksi PLTD Betano seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.12.

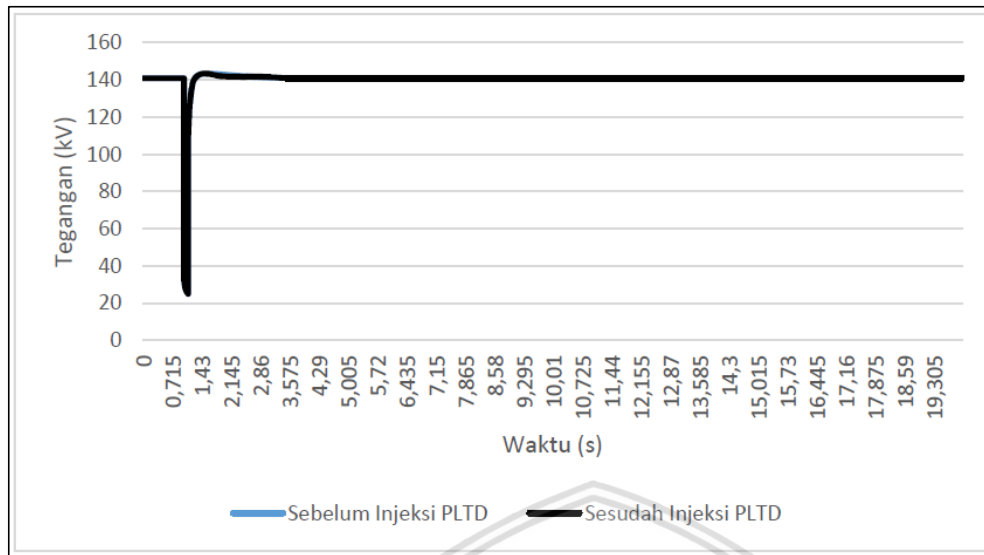
Tabel 5.12

Perbandingan Kestabilan Frekuensi Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Dili Substation)

Kondisi	f_{awal} (Hz)	f_{maks} (Hz)	$T_{pemulihan}$ (s)
Sebelum injeksi PLTD Betano	50	50,3	8,47
Sesudah injeksi PLTD betano	50	50,17	5,62

c. Kestabilan Tegangan

Hasil simulasi kestabilan tegangan sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.41 dan Tabel 5.13.



Gambar 5.41 Perbandingan kestabilan tegangan sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Dili Substation).

Grafik perbandingan kestabilan tegangan sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano menunjukkan kondisi tegangan saat sesudah injeksi tidak mengalami kenaikan dibandingkan saat sebelum injeksi. Saat terjadi gangguan, penurunan tegangan terbesar terjadi sebelum injeksi pembangkit. Waktu pemulihan tegangan lebih cepat saat sesudah injeksi PLTD Betano.

Tabel 5.13

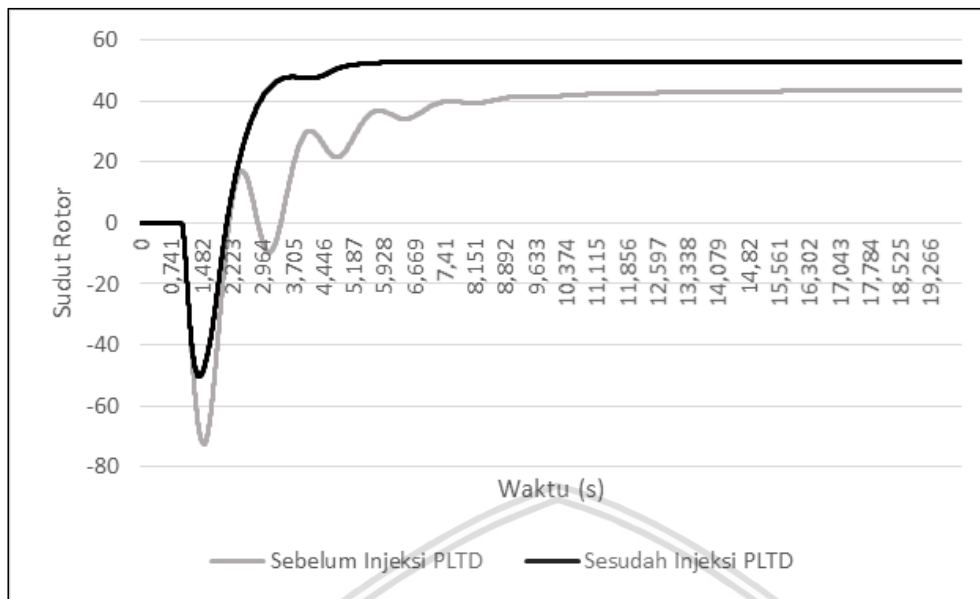
Perbandingan Kestabilan Tegangan Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Dili Substation)

Kondisi	V_{awal} (kV)	V_{drop} (kV)	$t_{pemulihan}$ (s)
Sebelum injeksi PLTD Betano	140,8	32,03	3,64
Sesudah injeksi PLTD Betano	140,8	32	3,58

2. Fault Liquica Substation

a. Kestabilan Sudut Rotor

Hasil simulasi kestabilan sudut rotor pra dan pasca injeksi PLTD Batano ditunjukkan pada Gambar 5.42 dan Tabel 5.14.



Gambar 5.42 Perbandingan kestabilan sudut rotor sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Liquica Substation).

Gambar 5.42 menunjukkan kestabilan sudut rotor mengalami osilasi lebih cepat sesudah injeksi PLTD Betano jika dibandingkan dengan sebelum injeksi PLTD. Waktu yang dibutuhkan sudut rotor generator untuk kembali dalam kondisi sinkron lebih cepat sesudah injeksi PLTD Betano seperti halnya bisa dilihat pada Tabel 5.14.

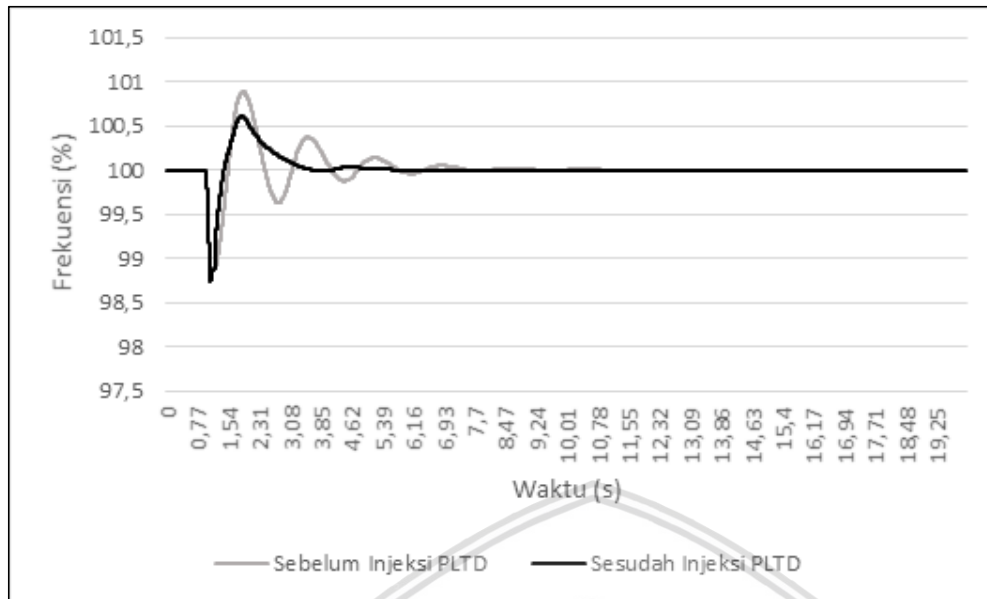
Tabel 5.14

Perbandingan Kestabilan Sudut Rotor Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Liquica Substation)

Kondisi	$\delta_{awal} (^{\circ})$	$\delta_{baru} (^{\circ})$	$T_{pemulihan} (s)$
Sebelum injeksi PLTD Betano	0	42,98	14,07
Sesudah injeksi PLTD Betano	0	52,56	6,03

b. Kestabilan Frekuensi

Hasil simulasi kestabilan frekuensi sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.43 dan Tabel 5.15.



Gambar 5.43 Perbandingan kestabilan frekuensi sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Liquica Substation).

Grafik perbandingan kestabilan frekuensi sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano menunjukkan bahwa, sebelum terjadi gangguan pada $t = 1$ detik generator beroperasi pada frekuensi normal senilai 50 Hz. Namun, setelah terjadinya disturbansi pada $t = 1$ detik frekuensi mengalami osilasi. Osilasi terbesar terjadi sebelum injeksi PLTD Betano jika dibandingkan dengan sesudah injeksi, dan waktu pemulihan frekuensi kembali normal jauh lebih cepat pada saat sesudah injeksi PLTD Betano. seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.12.

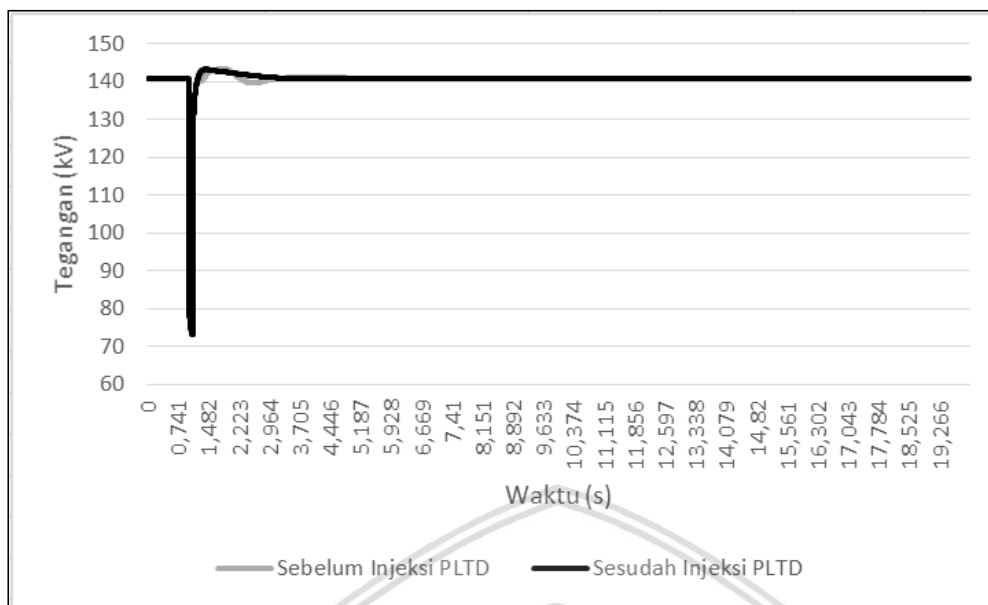
Tabel 5.15

Perbandingan Kestabilan Frekuensi Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Liquica Substation)

Kondisi	f_{awal} (Hz)	f_{maks} (Hz)	$T_{pemulihan}$ (s)
Sebelum injeksi PLTD Betano	50	50,89	9,05
Sesudah injeksi PLTD Betano	50	50,52	5,34

c. Kestabilan Tegangan

Hasil simulasi kestabilan tegangan sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.44 dan Tabel 5.16.



Gambar 5.44 Perbandingan kestabilan tegangan sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Liquica Substation).

Grafik perbandingan kestabilan tegangan sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano menunjukkan kondisi tegangan saat sesudah injeksi tidak mengalami kenaikan dibandingkan saat sebelum injeksi. Saat terjadi gangguan, penurunan tegangan terbesar terjadi sebelum injeksi pembangkit. Waktu pemulihan tegangan lebih cepat saat sesudah injeksi PLTD Betano.

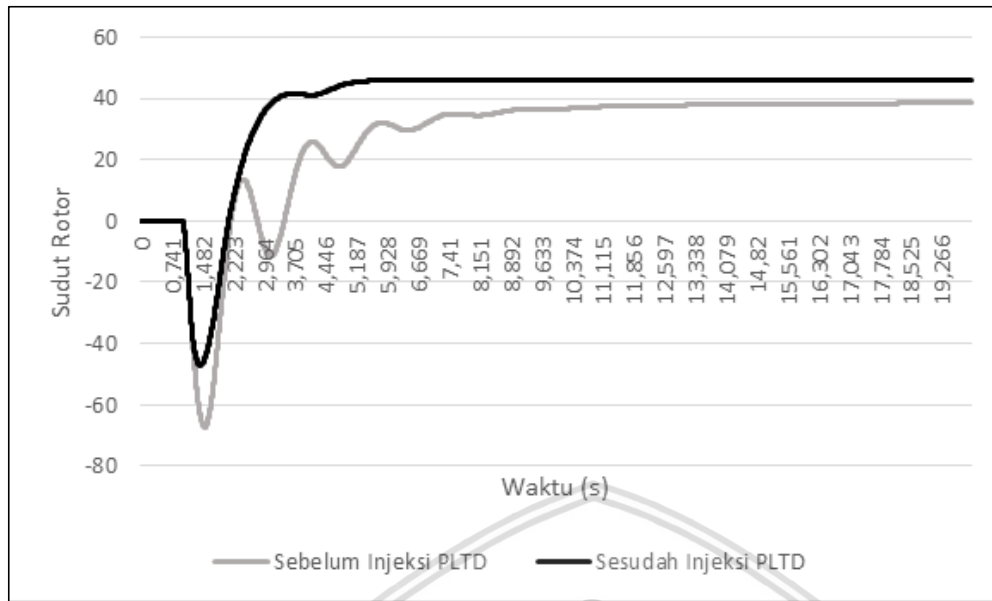
Tabel 5.16
Perbandingan Kestabilan Tegangan Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Liquica Substation)

Kondisi	V_{awal} (kV)	V_{drop} (kV)	$t_{pemulihan}$ (s)
Sebelum injeksi PLTD Betano	140,8	81,97	4,35
Sesudah injeksi PLTD Betano	140,8	81,9	3,07

3. Fault Manatuto Substation

a. Kestabilan Sudut Rotor

Hasil simulasi kestabilan sudut rotor pra dan pasca injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.45 dan Tabel 5.17.



Gambar 5.45 Perbandingan kestabilan sudut rotor sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Manatuto Substation).

Gambar 5.43 menunjukkan kestabilan sudut rotor mengalami osilasi lebih cepat sesudah injeksi PLTD Betano jika dibandingkan dengan sebelum injeksi PLTD. Waktu yang dibutuhkan sudut rotor generator untuk kembali dalam kondisi sinkron lebih cepat sesudah injeksi PLTD Betano seperti yang terlihat pada Tabel 5.17.

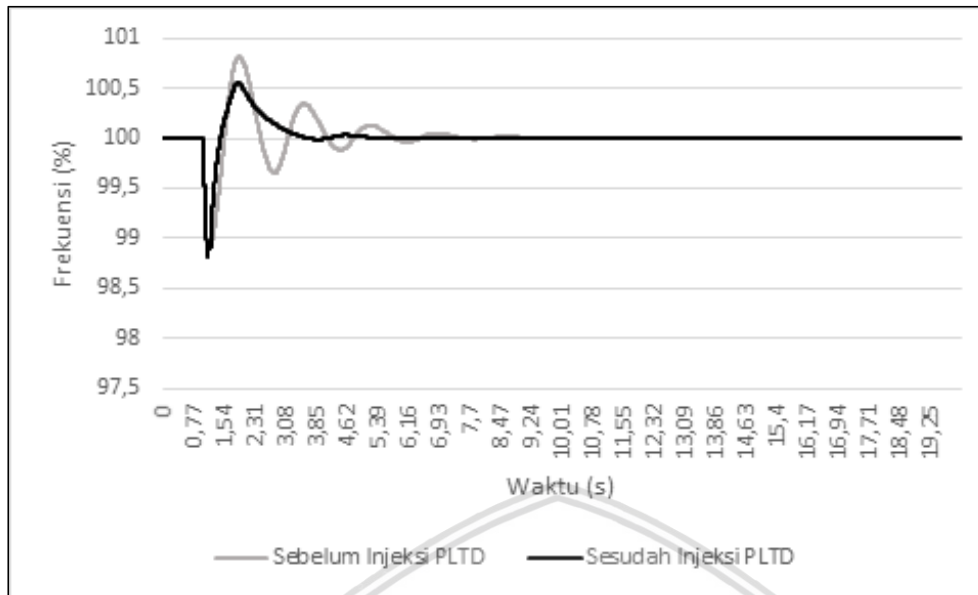
Tabel 5.17

Perbandingan Kestabilan Sudut Rotor Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Manatuto Substation)

Kondisi	$\delta_{awal} (^{\circ})$	$\delta_{baru} (^{\circ})$	$T_{pemulihan} (s)$
Sebelum injeksi PLTD Betano	0	38,29	17,43
Sesudah injeksi PLTD Betano	0	45,82	5,64

b. Kestabilan Frekuensi

Hasil simulasi kestabilan frekuensi sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.46 dan Tabel 5.18.



Gambar 5.46 Perbandingan kestabilan frekuensi sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault Mantuto Substation).

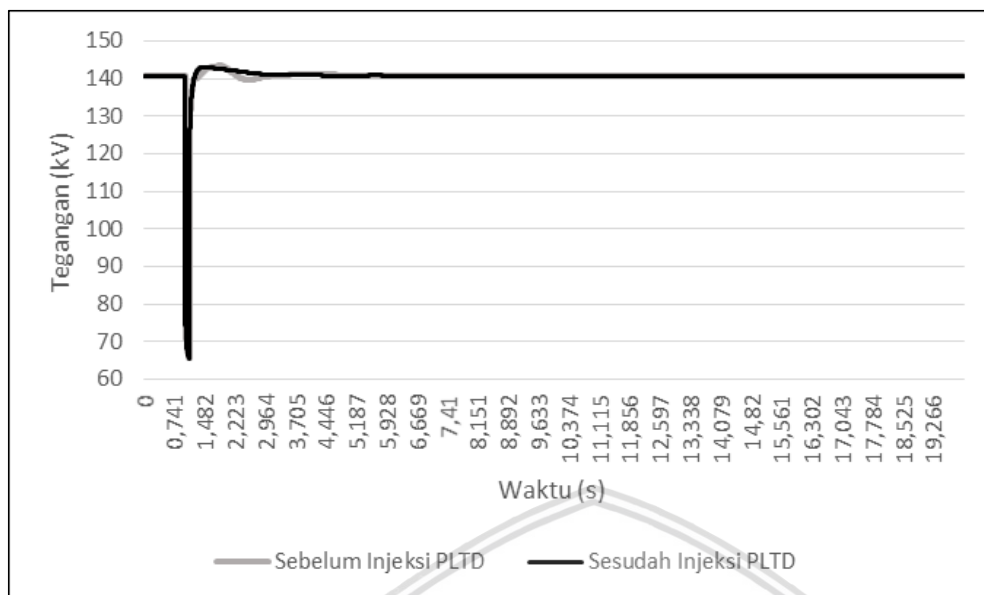
Grafik perbandingan kestabilan frekuensi sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano menunjukkan bahwa sebelum terjadi gangguan pada $t = 1$ detik generator beroperasi pada frekuensi normal senilai 50 Hz, setelah terjadinya distrubansi pada $t = 1$ detik frekuensi mengalami osilasi. Osilasi terbesar terjadi sebelum injeksi PLTD Betano jika dibandingkan dengan sesudah injeksi, dan waktu pemulihan frekuensi kembali normal jauh lebih cepat pada saat sesudah injeksi PLTD Betano seperti halnya ditampilkan pada Tabel 5.18.

Tabel 5.18
Perbandingan Kestabilan Frekuensi Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Manatuto Substation)

Kondisi	f_{awal} (Hz)	f_{maks} (Hz)	$T_{pemulihan}$ (s)
Sebelum injeksi PLTD Betano	50	50,8	9,08
Sesudah injeksi PLTD Betano	50	50,52	5,19

c. Kestabilan Tegangan

Hasil simulasi kestabilan tegangan sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.47 dan Tabel 5.19.



Gambar 5.47 Perbandingan kestabilan tegangan sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Manatuto Substation).

Grafik perbandingan kestabilan tegangan sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano menunjukkan kondisi tegangan saat sesudah injeksi tidak mengalami kenaikan dibandingkan saat sebelum injeksi. Saat terjadi gangguan, penurunan tegangan terbesar terjadi sebelum injeksi pembangkit. Waktu pemulihan tegangan lebih cepat saat sesudah injeksi PLTD Betano seperti yang terlihat pada Tabel 5.19.

Tabel 5.19

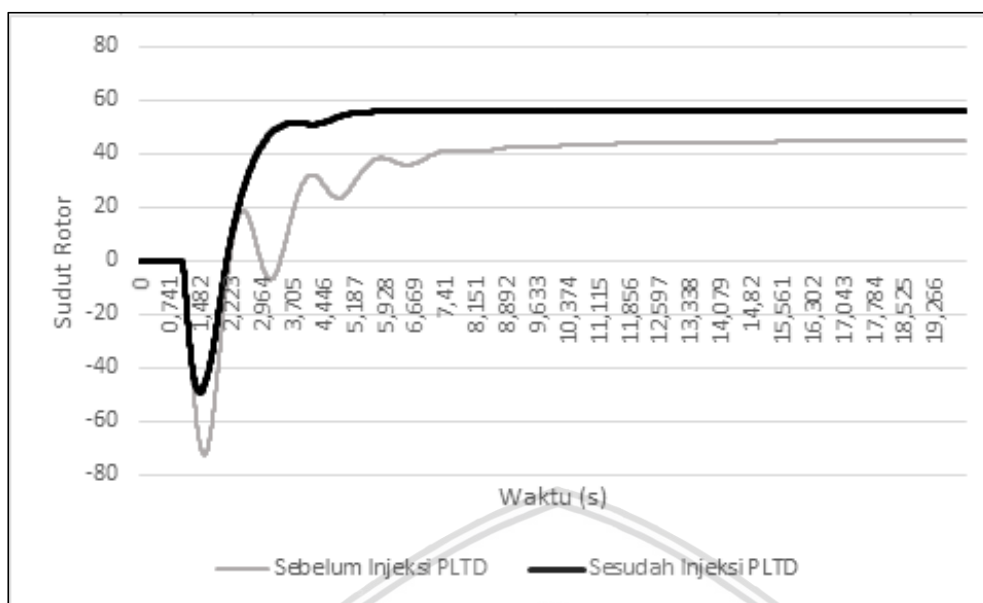
Perbandingan Kestabilan Tegangan Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Manatuto Substation)

Kondisi	V_{awal} (kV)	V_{drop} (kV)	$t_{pemulihan}$ (s)
Sebelum injeksi PLTD Betano	140,8	74,86	7,21
Sesudah injeksi PLTD Betano	140,8	74,8	4,17

4. Fault Baucau Substation

a. Kestabilan Sudut Rotor

Hasil simulasi kestabilan sudut rotor pra dan pasca injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.48 dan Tabel 5.20.



Gambar 5.48 Perbandingan kestabilan sudut rotor sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Baucau Substation).

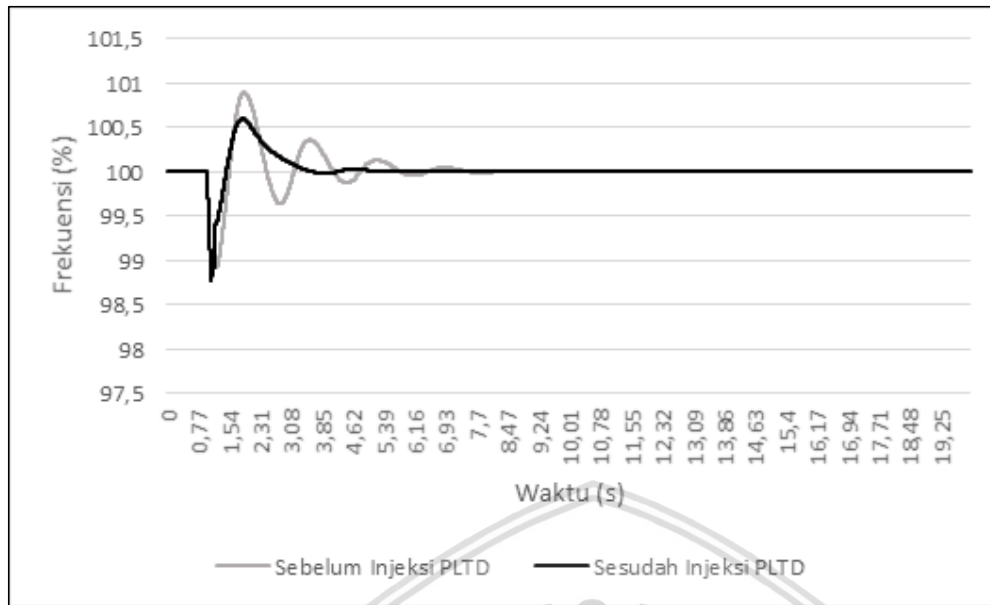
Gambar 5.48 menunjukkan kestabilan sudut rotor mengalami osilasi lebih cepat sesudah injeksi PLTD Betano jika dibandingkan dengan sebelum injeksi PLTD. Waktu yang dibutuhkan sudut rotor generator untuk kembali dalam kondisi sinkron lebih cepat sesudah injeksi PLTD Betano seperti halnya bisa dilihat pada Tabel 5.20.

Tabel 5.20
Perbandingan Kestabilan Sudut Rotor Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Baucau Substation)

Kondisi	$\delta_{awal} (^{\circ})$	$\delta_{baru} (^{\circ})$	$T_{pemulihan} (s)$
Sebelum injeksi PLTD Betano	0	44,3	15
Sesudah injeksi PLTD betano	0	55,32	5,41

b. Kestabilan Frekuensi

Hasil simulasi kestabilan frekuensi sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.49 dan Tabel 5.21.



Gambar 5.49 Perbandingan kestabilan frekuensi sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Baucau Substation).

Grafik perbandingan kestabilan frekuensi sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano menunjukkan bahwa sebelum terjadi gangguan pada $t = 1$ detik generator beroperasi pada frekuensi normal senilai 50 Hz, setelah terjadinya distorsi pada $t = 1$ detik frekuensi mengalami osilasi. Osilasi terbesar terjadi sebelum injeksi PLTD Betano jika dibandingkan dengan sesudah injeksi, dan waktu pemulihan frekuensi kembali normal jauh lebih cepat pada saat sesudah injeksi PLTD Betano seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.21.

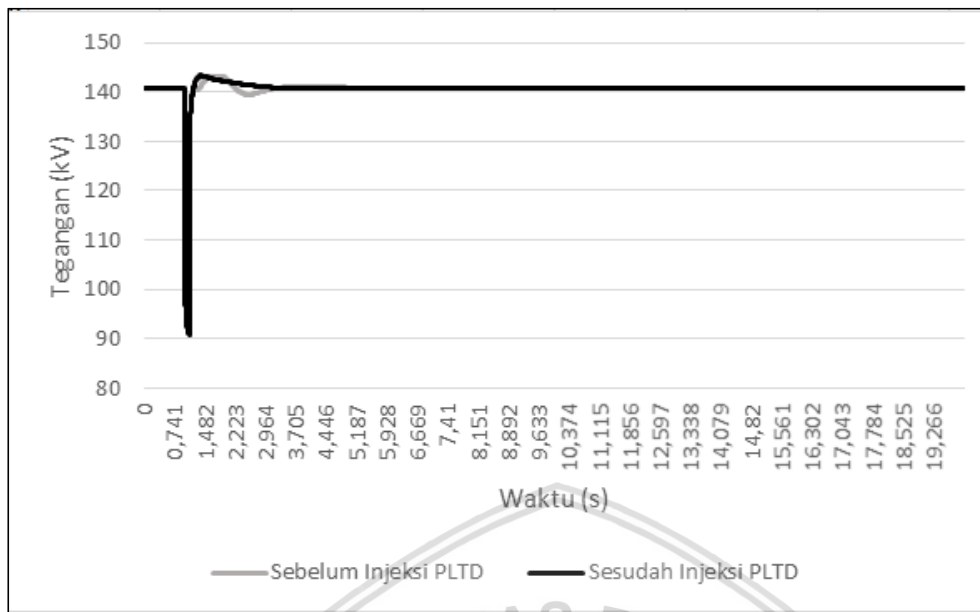
Tabel 5.21

Perbandingan Kestabilan Frekuensi Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Baucau Substation)

Kondisi	f_{awal} (Hz)	f_{maks} (Hz)	$T_{pemulihan}$ (s)
Sebelum injeksi PLTD Betano	50	50,89	9
Sesudah injeksi PLTD Betano	50	50,61	5,34

c. Kestabilan Tegangan

Hasil simulasi kestabilan tegangan sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.50 dan Tabel 5.22.



Gambar 5.50 Perbandingan kestabilan tegangan sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano (fault pada Baucau Substation).

Grafik perbandingan kestabilan tegangan sebelum dan sesudah injeksi PLTD Betano menunjukkan kondisi tegangan saat sesudah injeksi tidak mengalami kenaikan dibandingkan saat sebelum injeksi. Saat terjadi gangguan, penurunan tegangan terbesar terjadi sebelum injeksi pembangkit. Waktu pemulihan tegangan lebih cepat saat sesudah injeksi PLTD Betano seperti yang bisa dilihat pada Tabel 5.22.

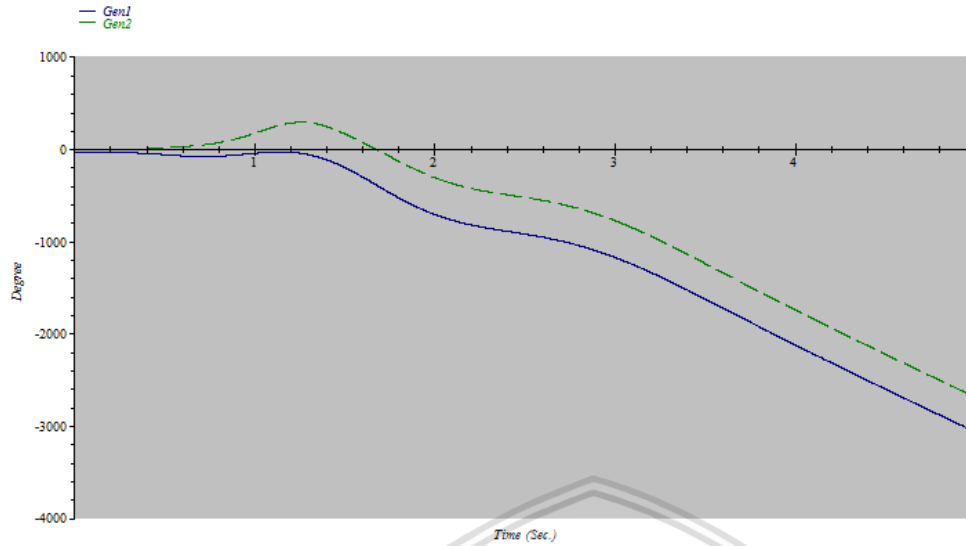
Tabel 5.22

Perbandingan Kestabilan Tegangan Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano (Fault pada Baucau Substation)

Kondisi	V_{awal} (kV)	V_{drop} (kV)	$t_{pemulihan}$ (s)
Sebelum injeksi PLTD Betano	140,8	98,45	5
Sesudah injeksi PLTD Betano	140,8	98,4	3,12

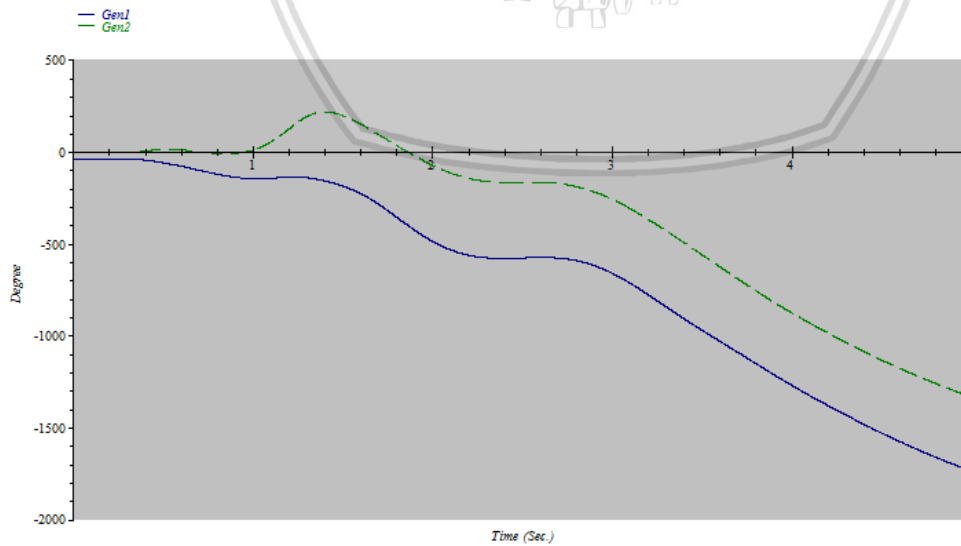
5.6 Waktu Pemutusan Kritis

Dalam kasus ini, disturbansi yang dipakai untuk simulasi adalah disturbansi hubungan singkat 3 fasa. Gangguan hubung singkat 3 fasa terjadi pada Dili Substation. Untuk mendapatkan nilai waktu pemutusan kritis maka teknik yang digunakan adalah teknik *trial and error*. Hasil simulasi waktu pemutusan kritis seperti ditunjukkan pada Gambar 5.51.



Gambar 5.51 Grafik waktu pemutusan kritis sudut rotor sebelum injeksi PLTD Betano (fault pada Dili Substation).

Gambar 5.51 memperlihatkan grafik waktu pemutusan kritis sudut rotor generator sebelum injeksi PLTD Betano dengan gangguan pada Dili Substation, akan mengalami pelepasan sinkron pada distrubansi yang berlaku pada 0,64 s dengan nilai sudut rotor sebesar $37,97^{\circ}$ untuk Generator pertama (G1). Generator kedua (G2) mengalami pelepasan sinkron pada distrubansi yang berlaku pada 0,35 s dengan nilai sudut rotor sebesar $-37,34^{\circ}$. Sedangkan hasil simulasi waktu pemutusan kritis sesudah injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Gambar 5.52.



Gambar 5.52 Grafik waktu pemutusan kritis sudut rotor sesudah injeksi PLTD Betano (fault Dili Substation).

Gambar 5.52 memperlihatkan grafik waktu pemutusan kritis sudut rotor generator sesudah injeksi PLTD Betano dengan gangguan yang terjadi pada Dili Substation, akan mengalami pelepasan sinkron pada disturbansi yang berlaku pada 1 s dengan nilai sudut rotor sebesar $16,41^0$ untuk Generator pertama (G1). Generator kedua (G2) mengalami pelepasan sinkron pada disturbansi yang berlaku pada 0,39 detik dengan nilai sudut rotor sebesar $-41,33^0$. Perbandingan waktu pemutusan kritis sudut rotor generator pra dan pasca injeksi PLTD Betano ditunjukkan pada Tabel 5.23.

Tabel 5.23

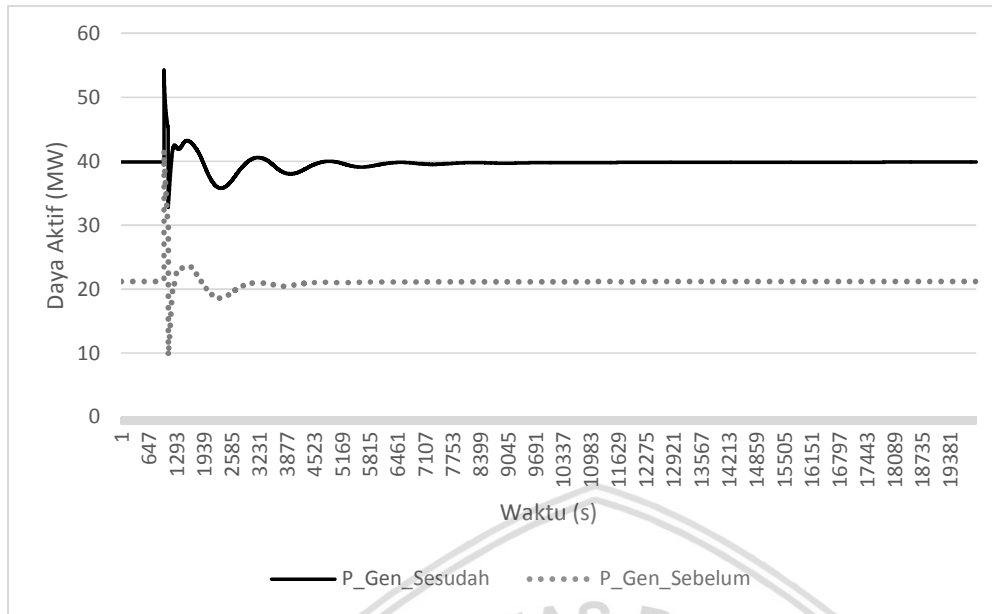
Perbandingan Waktu Pemutusan Kritis Sebelum dan Sesudah Injeksi PLTD Betano

No	Generator	Waktu Pemutusan Kritis	
		Sebelum Injeksi PLTD durasi waktu (detik)	Sesudah Injeksi PLTD durasi waktu (detik)
1.	G1	0,64	1
2.	G2	0,35	0,39

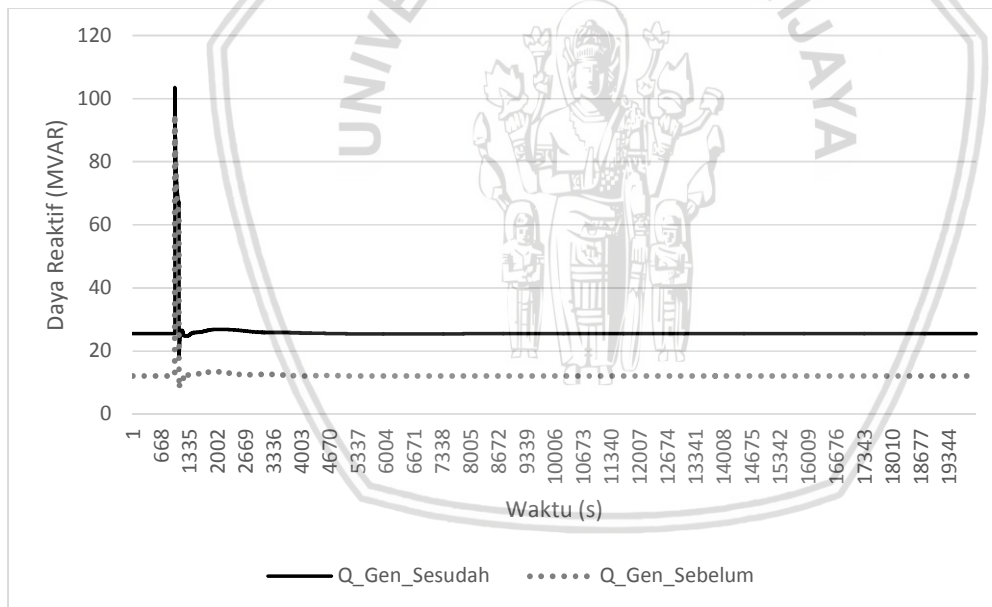
Dari Tabel 5.23 waktu pemutusan kritis pada sistem kelistrikan Timor Leste sesudah injeksi PLTD Betano memiliki waktu yang lebih lama 0,36 detik dibandingkan dengan waktu pemutusan kritis sebelum injeksi PLTD Betano.

5.7 Pengaruh Injeksi Pembangkit Baru Terhadap Daya Generator

Kemampuan daya aktif dan daya reaktif generator merupakan kemampuan generator dalam mengirimkan daya ke beban. Berdasarkan grafik pada Gambar 5.51 dan Gambar 5.52 ini dapat dilihat bahwa dengan adanya injeksi pembangkit baru ke sistem, maka nilai daya aktif yang dikirimkan generator ke sistem semakin meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa dengan adanya injeksi pembangkit baru ke sistem dapat meningkatkan penyaluran daya aktif dan reaktif ke beban. Dari Gambar 5.53 dan Gambar 5.54 di bawah menunjukkan generator dapat mengirimkan daya ke jaringan. Ketika sistem mengalami gangguan pada $t = 1$ detik, terjadi osilasi daya aktif dan daya reaktif yang terjadi beberapa detik dan kembali normal beberapa saat kemudian.



Gambar 5.53 Grafik daya aktif generator sebelum dan sesudah injeksi pembangkit baru.



Gambar 5.54 Grafik daya reaktif generator sebelum dan sesudah injeksi pembangkit baru.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Sesuai dengan simulasi dan analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini, maka bisa ditarik beberapa kesimpulan, antara lain:

1. Hasil analisis sebelum dilakukan injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano, menunjukkan kondisi tegangan di beberapa *feeder* yaitu *feeder 1*, *feeder 2* dan *feeder 6* (Distrik Dili) di bawah standar operasi jaringan yang ditetapkan, berkisar antara 10,82% hingga 13% dari tegangan kirimnya. Rugi-rugi daya aktif senilai 6,8% dan rugi-rugi daya reaktif senilai 52%.
2. Hasil analisis sesudah dilakukan injeksi PLTD Hera dan PLTD Betano, menunjukkan dampak ineksi daya oleh PLTD Hera dan PLTD Betano terhadap sistem yaitu penurunan tegangan maksimum yang terjadi berkisar antara 6% hingga 10%. Rugi-rugi daya aktif dapat diminimalisir hingga mencapai 5,3% dan rugi-rugi daya reaktif dapat diminimalisir hingga mencapai 0,55%.

Hasil analisis kestabilan sistem tenaga menunjukkan kestabilan sudut rotor, kestabilan frekuensi, dan kestabilan tegangan pada sistem kelistrikan Timor Leste lebih stabil pada saat sesudah injeksi PLTD Betano dengan nilai waktu pemulihan setelah gangguan tiga fasa lebih cepat dibandingkan sebelum injeksi.

6.2 Saran

Setelah dilakukan analisis aliran daya dan analisis kestabilan sistem tenaga akibat masuknya pembangkit baru ke sistem, mengakibatkan perubahan aliran daya sistem secara keseluruhan.

1. Penelitian selanjutnya diharapkan untuk memaksimalkan dengan melakukan kajian mengenai kondisi *short circuit* dan koordinasi sistem proteksi akibat masuknya pembangkit baru.
2. Melakukan kajian *optimal power flow*, untuk menekan biaya bahan bakar yang digunakan dalam pengoperasian unit-unit pembangkit tenaga listrik (PLTD).



DAFTAR PUSTAKA

- Bisen, P dan Shrivastava, A. 2013. *Comparison between SVC and STATCOM FACTS Devices for Power System Stability Enhancement*. International Journal on Emerging Technologies., 4(2), pp.101-109.
- Cekdin, C. 2007. *Sistem Tenaga Listrik, Contoh Soal dan Penyelesaian Menggunakan MATLAB*. Penerbit ANDI. Yogyakarta.
- Chaudhary, A dan Jaswal, R.A. 2014. *Transient Stability Improvement of Multi Machine Power System Using Static VAR Compensator*. International Journal of Electronic and Electrical Vol. 7, No. 2, pp. 109-114
- Electricidade de Timor-Leste (EDTL). 2015. *Data Sistem Kelistrikan Timor Leste*.
- Electricidade de Timor-Leste (EDTL). 2009. *Data Sistem Kelistrikan Timor Leste*.
- Kementerian ESDM R.I. 2007. *Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Jawa-Madura-Bali*. Peraturan Menteri (Permen) No. 03. Jakarta.
- Kundur dkk. 2004. Definition and Classification of Power System Stability. *IEEE Transactions On Power System*, Vol. 19, No. 2, pp. 1387-1401.
- Kundur, Praba. 1994. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Inc. New York
- Kumara, D. T, Penangsang, Ontoseno, Aryani, N. K. 2016. *Analisa Stabilitas Transien pada Sistem Transmisi Sumatra Utara 150 kV – 275 kV dengan Penambahan PLTS Batang Toru 4 x 125 MW*. Jurnal Teknik ITS Vol. 5, No.2, pp. B202-B26
- Saadat, H. 1999. *Power System Analysis*. McGRAW-Hill International Editions.
- Surusa, P.E.F, Suyono, H, Wijono. 2016. *Analisis Steady State dan Dinamik pada Perencanaan Pengembangan Pembangkit Sistem Gorontalo*. Jurnal Arus Elektro Indonesia (JAEI) Vol. 2, No. 1, pp. 9-14.
- Suyono, H, Zainuddin, M. 2015. *Injection Impact of Photovoltaic Distributed Generation (PVDG) on Power Distribution System Stability*. Applied Mechanic and Materials Vol. 75, pp. 403-408.